

2ej. 149

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA



LA INGENIERIA DE SISTEMAS APLICADA
A LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A N

EMILIO A. SAINT MARTIN POSADA
Y
JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES

México, D. F.

1981



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

82 I N D I C E
001
1. INGENIERIA DE SISTEMAS 1

1.1	INTRODUCCION A LA INGENIERIA DE SISTEMAS ..	1
1.1.1	Metodología de la Ingeniería de Sistemas ..	5
1.1.2	El Ciclo Básico de un Sistema	12
1.1.3	Características importantes de la Ingeniería de Sistemas	17
1.1.4	La Ingeniería de Sistemas ante la toma de decisiones	22
1.2	MODELOS	24
1.2.1	Clasificación y descripción de modelos	26
1.2.2	El Proceso de Decisión	32
1.3	TECNICAS DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS	40
1.3.1	Optimización	46
1.3.1.1	Modelos Determinísticos	50
1.3.1.1.1	Programación Clásica	50
1.3.1.1.2	Programación Lineal	52
1.3.1.1.3	El Problema de Transporte	64
1.3.1.1.4	El Problema de Asignación	71
1.3.1.1.5	Redes de Optimización	74
1.3.1.1.6	Programación Dinámica	79
1.3.1.1.7	Programación Entera y Heurística	83
1.3.1.1.8	Programación No-lineal	88
1.3.1.2	Modelos Estocásticos	93
1.3.1.2.1	Procesos Markovianos de Decisión	94
1.3.1.2.2	Inventarios	96

1.3.1.2.3 Reemplazo	98
1.3.1.2.4 Teoría de Líneas de Espera	100
1.3.1.2.5 Programación y Redes Estocásticas	112
1.3.1.2.6 Programación con Metas Múltiples	116
1.3.1.2.7 Problema de Localización	119
1.3.1.2.8 Problemas de Secuenciación	122
1.3.1.2.9 Teoría de Juegos	124
1.3.1.3 Técnicas para resolver sistemas de gran es- cala	125
1.3.2 Simulación	126
1.3.2.1 Métodos de Monte Carlo	130
1.3.2.2 Números Aleatorios	132
1.3.2.3 Estimación del tamaño de la muestra	134
1.3.2.4 Lenguajes de simulación	136
1.3.3 Análisis de Decisiones	136
1.4 EL FUTURO DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS	157
2. SISTEMAS DE TRANSPORTE	167
2.1 INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE .	167
2.2 SISTEMA CARRETERO	174
2.2.1 Generalidades	174
2.2.2 Planeación	177
2.2.2.1 Esquema Director de Carreteras	179
2.2.2.2 Plan Nacional de Modernizaciones	181
2.2.2.3 Planes Estatales de Carreteras	183
2.2.3 Proyectos y su evaluación	185
2.2.3.1 Vía	187

2.2.3.2. Vehículos	192
2.2.3.3. Usuarios	199
2.3 SISTEMA FERROVIARIO	200
2.3.1 Generalidades	200
2.3.2 Planeación	201
2.3.3 Proyecto y su evaluación	206
2.3.3.1 Vía	206
2.3.3.2 Vehículo	208
2.3.3.3 Usuario	210
2.3.4 Estación ferroviaria y operación del sistema	211
2.4 SISTEMA AEROPORTUARIO	213
2.4.1 Generalidades	213
2.4.2 Planeación	215
2.4.2.1 Análisis de la demanda de transporte aéreo	216
2.4.2.2 Análisis de la actividad aérea	218
2.4.2.3 Previsión Tecnológica	220
2.4.3 Proyecto y evaluación económica de aeropuertos	222
2.4.3.1 Vía	223
2.4.3.2 Vehículo	224
2.4.3.3 Usuario	227
2.4.4 Aeropuertos	227
2.5 SISTEMA PORTUARIO	236
2.5.1 Generalidades	236
2.5.2 Planeación	238
2.5.2.1 Las necesidades del comercio marítimo	239

transporte	292
3.2.2 Geometría del transporte	296
3.2.3 Los costos del transporte	299
3.2.4 Erróneos usos del concepto de velocidad ...	309
3.3 DISEÑO DEL SISTEMA Y USOS DE LA TIERRA	318
3.3.1 Modelación del flujo de vehículos	318
3.3.2 La simulación de sistemas de transporte ...	325
3.3.3 El concepto de control	334
3.3.4 Los factores humanos	339
3.3.5 La planeación del uso de la tierra	344
3.3.6 Las interrelaciones de los sistemas de ---- transporte y el uso de la tierra	348
3.4 LOS MODELOS EN LA PLANEACION DE SISTEMAS DE TRANSPORTE	353
3.4.1 Fijación de políticas	354
3.4.2 Estudios y pronósticos	355
3.4.3 Estudio de alternativas	366
3.4.4 Ejecución e implementación	367
4. EJEMPLOS DE APLICACION	369
5. CONCLUSIONES	501
BIBLIOGRAFIA	507

...esta es una característica de esta disciplina que se le da el nombre de "sistema", calificativo que se le da a un conjunto de elementos que interactúan y se relacionan entre sí para cumplir una función específica. Este conjunto de elementos y sus relaciones se denominan "sistema".

1.1. INGENIERIA DE SISTEMAS.

...según se define, "la ingeniería de sistemas es la disciplina que se ocupa de la concepción, el análisis, el diseño, la construcción y la operación de sistemas complejos que integran recursos humanos, materiales y tecnológicos para satisfacer las necesidades de una organización o sociedad."

1.1. INTRODUCCION A LA INGENIERIA DE SISTEMAS.

Para hablar de Ingeniería de Sistemas y para comprender su metodología es necesario tener nociones acerca de qué es un sistema, de cuáles son sus características esenciales, y de cuál es su función y comportamiento.

Actualmente se encuentra en boga el uso de la palabra "sistema"; palabra que, con frecuencia, hallamos acompañada de un calificativo que indica la clase del mismo al cual se hace referencia. Existe un sinnúmero de sistemas distintos y es común que en el desempeño de nuestras labores cotidianas, nos veamos relacionados con una gran variedad de ellos. Por ejemplo, todos somos integrantes de un determinado sistema social, pertenecemos a un sistema económico y formamos parte de un sistema político.

Es de nuestro conocimiento que el éxito de una organización o de una empresa, depende fundamentalmente de un adecuado sistema administrativo.

Una comunidad requiere que se le dote de sistemas que satisfagan sus necesidades y que se le proporcionen servi---

cios, lo cual se logra mediante la implementación de sistemas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado, sistemas de alumbrado y suministro de energía eléctrica, sistemas de abastecimiento de alimentos, sistemas de comunicación (teléfono, correo, telégrafo, prensa, radio, televisión, --- etc.) y sistemas de transporte (carreteras, aeropuertos, --- puertos, ferrocarriles y transporte urbano), entre otros.

Un edificio, una ciudad, un vehículo, una ideología, un gobierno, un reglamento y un idioma son ejemplos, todos ellos, de algunos sistemas que nos son familiares y que encontramos por doquier.

El medio que nos circunda es un conjunto infinito de diversos sistemas que condicionan nuestra existencia en todos los aspectos. Aun el cuerpo humano está constituido por sistemas; el sistema nervioso, por mencionar alguno. El universo se halla formado por sistemas en su totalidad.

Lo que pretendemos con esto es poner de manifiesto que dondequiera que nos situemos y hacia donde sea que dirijamos nuestra atención, siempre encontraremos sistemas y que, por lo tanto, en todo tiempo estamos vinculados a ellos sin poder evitarlo.

En estas circunstancias y considerando el uso frecuente que damos a este vocablo, cabe esperar que todos tengamos una idea acerca de lo que significa tal concepto. Esto es --- cierto, pero en ocasiones esa idea es vaga e incluso errónea. La discordancia se atribuye al hecho de que los especialistas en sistemas han creado confusión sobre el término, pues al intentar definirlo cada cual lo ha interpretado de acuer-

do a su modo particular de ver los sistemas y según su campo de acción. Así, por ejemplo, para un especialista en computación un sistema es una combinación de equipo (hardware) y programas (software) que se utilizan en el desempeño de una tarea; obviamente se trata de un sistema de cómputo y dado que esta interpretación resulta muy específica, no es aplicable a sistemas en general. Lo mismo acontece con otras definiciones.

Para dar una definición general y aplicable a todos los sistemas debemos observar que, aun tratándose de sistemas diferentes, existen en ellos ciertas características comunes.- Todo sistema está formado por varios componentes que se encuentran interconectados entre sí y que actúan combinados en un cierto arreglo, para el logro de un objetivo determinado. Teniendo esto presente, es posible llegar a la siguiente definición que cumple con lo antes señalado:

SISTEMA es un conjunto de elementos interrelacionados entre sí que tienen un fin común, donde el estudio de uno de los elementos implica el estudio de las relaciones de ese elemento con los demás.

Puede darse el caso de que un elemento de un sistema dado a su vez constituya un sistema particular, es decir, un sistema también puede estar integrado por sistemas; a este tipo de elementos se les denomina "subsistemas".

Esquemáticamente, un sistema en general con todas sus características significativas queda representado en la figura

esquema de sistema y muestra los flujos de información entre los subsistemas y el ambiente. El ambiente es el entorno del sistema y los subsistemas interactúan entre sí y con el ambiente. El sistema está limitado por fronteras que separan el sistema del ambiente.

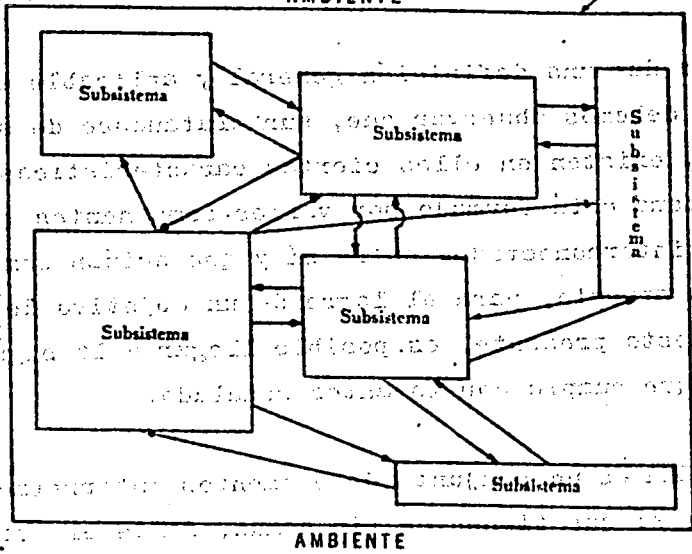


Fig. 1.1 Esquema de un sistema.

ra 1.1.

Cada elemento o subsistema incluye recursos tales como material, equipo, personal, información, etc. El sistema aparece rodeado por un ambiente de características físicas, sociales, políticas, económicas y técnicas. El ambiente define las fronteras del sistema.

1.1.1 Metodología de la Ingeniería de Sistemas.

Como una consecuencia de la necesidad de planificar, diseñar y operar sistemas cada día más complejos que solucionen los grandes problemas sociotécnicos, ha surgido una nueva filosofía o metodología denominada "Ingeniería de Sistemas". Se le llama "Ingeniería" por su énfasis en la aplicación de conceptos cuantitativos a problemas concretos; y "de Sistemas" por su tendencia a analizar problemas desde un punto de vista global prestando atención especial a la interacción entre los componentes del problema.

La Ingeniería de Sistemas se interesa sólo por aquellos sistemas de comportamiento, y en particular aquellos que están sujetos al control humano. De esta forma, el sistema solar no sería de interés para el ingeniero de sistemas. Por lo tanto, el dominio de la Ingeniería de Sistemas viene siendo los sistemas de "comportamiento controlable". Una característica de un sistema de comportamiento es que éste consista de partes interdependientes, pero con dinámica individual y-

El análisis de sistemas requiere un enfoque integral porque al utilizar simultáneamente los puntos de vista de diversas disciplinas, se tiende hacia el análisis de la totalidad de los componentes o aspectos bajo estudio, así como de sus interrelaciones. Además, el enfoque de sistemas tiende hacia la aplicación de una perspectiva global en el sentido que no aborda detalladamente un subsistema o aspecto específico del sistema, si no cuenta previamente con un panorama del ambiente externo del mismo, sus objetivos, recursos y principales características. Esto último asegura la interpretación realista y evaluación de todos los efectos y repercusiones de un problema dentro del contexto del sistema al que pertenece, lo cual representa una garantía en cuanto a la permanencia y efectividad de las soluciones recomendadas por el análisis de sistemas.

Es necesario señalar aquí que el análisis de sistemas no es sólo un "análisis" desde un punto de vista o enfoque que implica sólo un proceso de estudio y diagnóstico, sino un procedimiento activo de implementación de soluciones.

Se puede decir que el enfoque de sistemas es la "espinadorsal" o estructura de análisis fundamental para el analista de sistemas. Partiendo de esta base, entonces se deberá pasar a la consideración de las técnicas o herramientas disponibles para la identificación, rediseño o implementación del nuevo sistema, si es que éste existe; o para su planeación y desarrollo, si es que el sistema todavía no existe.

En general, una técnica de sistemas es cualquier procedimiento sistemático (cuantitativo, de preferencia aunque no

diferente.

La Ingeniería de Sistemas (también llamada "análisis de sistemas") no es un punto de vista, o método de análisis disciplinario; esto es, el tipo de variables o aspectos de interés para el analista o ingeniero de sistemas no se limita al de una disciplina en todos los casos.

El análisis de sistemas funciona no por actividades, si no por objetivos; es decir, su orientación y metodología — tiende a diseñarse de acuerdo al objetivo del sistema, limitado por las características del ambiente general y por los recursos con que cuenta el sistema.

Al hablar de objetivos no se implica el uso de un programa rígido de actividades como característica básica de un proyecto; sino la aplicación de una metodología o estrategia general cuyas actividades específicas bien podrían ser diferentes de un caso a otro de acuerdo a las necesidades del sistema, aun cuando los objetivos del proyecto fueran los mismos en ambos casos. Esta metodología es la base fundamental para la implementación de la Ingeniería de Sistemas. Las características de esta metodología incluyen una orientación interdisciplinaria, en el sentido que generalmente el logro de uno o más objetivos en cualquier sistema requiere no sólo de un análisis legal, ingenieril, contable o administrativo, sino de la conjunción de estos. La metodología de sistemas — también tiende hacia la cuantificación de resultados, pues — su énfasis en la objetividad de sus recomendaciones requiere tanto de las comparaciones cuantitativas entre alternativas — como de análisis bajo bases comunes.

El análisis de sistemas requiere un enfoque integral porque al utilizar simultáneamente los puntos de vista de diversas disciplinas, se tiende hacia el análisis de la totalidad de los componentes o aspectos bajo estudio, así como de sus interrelaciones. Además, el enfoque de sistemas tiende hacia la aplicación de una perspectiva global en el sentido que no aborda detalladamente un subsistema o aspecto específico del sistema, si no cuenta previamente con un panorama del ambiente externo del mismo, sus objetivos, recursos y principales características. Esto último asegura la interpretación realista y evaluación de todos los efectos y repercusiones de un problema dentro del contexto del sistema al que pertenece, lo cual representa una garantía en cuanto a la permanencia y efectividad de las soluciones recomendadas por el análisis de sistemas.

Es necesario señalar aquí que el análisis de sistemas no es sólo un "análisis" desde un punto de vista o enfoque que implica sólo un proceso de estudio y diagnóstico, sino un procedimiento activo de implementación de soluciones.

Se puede decir que el enfoque de sistemas es la "espinadorsal" o estructura de análisis fundamental para el analista de sistemas. Partiendo de esta base, entonces se deberá pasar a la consideración de las técnicas o herramientas disponibles para la identificación, rediseño o implementación del nuevo sistema, si es que éste existe; o para su planeación y desarrollo, si es que el sistema todavía no existe.

En general, una técnica de sistemas es cualquier procedimiento sistemático (cuantitativo, de preferencia aunque no

exclusivamente) que apoye al analista de sistemas en la implementación del enfoque de sistemas para el logro de una finalidad u objetivo.

La metodología de la Ingeniería de Sistemas es, entonces, la base fundamental para lograr resultados; y consiste de todas aquellas herramientas que permiten la conjunción de diferentes puntos de vista disciplinarios dentro de un marco "de sistemas".

El primer requisito fundamental para iniciar la implementación de un análisis de sistemas es la formación de un grupo interdisciplinario de trabajo.

Una vez realizado lo anterior, la primera etapa del análisis es la definición del "ambiente" dentro del cual el sistema se desarrollará. Esta no es una labor trivial, pues requiere de la identificación de una serie de factores cualitativos por medio de criterios no necesariamente bien definidos.

Esta primera etapa proporciona al grupo interdisciplinario la perspectiva o marco de referencia dentro del cual se desarrollará el sistema, con lo cual se establecen las bases para definir las "fronteras", alcances u objetivos del mismo, que integran la segunda etapa.

Una vez lograda una visión clara del ambiente externo y alcances del sistema, se procede a la tercera etapa: la definición de los recursos del sistema. Al definir los recursos con que se cuenta o se contarán en el futuro, se establecen las restricciones básicas del sistema.

La cuarta etapa es la integración conceptual de los

tres elementos anteriores: ambiente, objetivos y recursos. -- Esto significa que en esta etapa se deberán identificar y analizar las interacciones entre dichos elementos, ya que habrá posible un mejor entendimiento del futuro funcionamiento del sistema y asegurará la consistencia del mismo, o sea, -- que los objetivos puedan alcanzarse dentro de las restricciones del ambiente y que los recursos definidos realmente contribuyan al logro de los objetivos.

El cumplimiento efectivo de las cuatro etapas descritas es una base sólida para la representación conceptual del sistema, o sea, su modelación.

La Ingeniería de Sistemas aplica las nuevas técnicas de Investigación de Operaciones a la solución de problemas. Estas técnicas utilizan modelos matemáticos que describen las interacciones entre los componentes del sistema. Los modelos matemáticos resultan ser bastante apegados a la realidad y son más flexibles que los modelos físicos utilizados en experimentos de laboratorio para estudiar el comportamiento de sistemas reales. Además, los modelos físicos de sistemas complejos son demasiado caros y difíciles de construir. En general, cualquier modelo no es más que la representación de la realidad y por consiguiente no incluye todos los aspectos -- del problema analizado. Empero, un modelo presenta una descripción más concisa del problema y enfatiza los aspectos -- más importantes del mismo. La Ingeniería de Sistemas es entonces una forma de resolver problemas. La solución es un modelo del sistema, una serie de especificaciones para idear, diseñar e implementar el sistema. En ocasiones la solución --

se considera óptima cuando satisface un objetivo de la mejor forma posible. No obstante, muchas veces, en problemas complejos existen tantas alternativas de solución que resulta imposible obtener la mejor u óptima; entonces, la estrategia de la Ingeniería de Sistemas es buscar un compromiso entre el carácter óptimo de la solución y el costo de su obtención.

La metodología de la Ingeniería de Sistemas puede conceptualizarse a través de una serie de etapas conocidas como el "ciclo básico de un sistema" (presentado en la siguiente sección). Cada etapa se caracteriza por una serie de actividades fundamentales que reciben el nombre de "proceso básico de decisión". Las etapas representan la evolución del sistema, desde su planeación inicial, hasta su implementación.

Existen actualmente dos tendencias filosóficas dentro de la Ingeniería de Sistemas: Un grupo tiende a enfatizar y desarrollar técnicas matemáticas y analíticas, con especial interés en algoritmos, poniendo atención en una o dos etapas del ciclo de vida del sistema. A este grupo se le atribuye el título de "científicos en sistemas". El grupo de la segunda tendencia es más heterogéneo, y tiende a considerar los aspectos cualitativos del problema, con igual interés en todas las etapas de la metodología. Este grupo comprende desde "filósofos de sistemas" hasta "ingenieros de sistemas", con una educación balanceada en técnicas cuantitativas, modelos, computación, planificación, etc.

La Ingeniería de Sistemas lo mismo es un arte que una ciencia. Su metodología requiere el uso de conceptos económicos, administrativos, sociales, técnicos, etc.

Una definición usual dentro de círculos académicos considera la Ingeniería de Sistemas como un grupo de conceptos y técnicas matemáticas que incluyen probabilidad y estadística, teoría de sistemas, teoría de optimización y algoritmos en general. En realidad, éstas solamente son técnicas de la Ingeniería de Sistemas.

Otra definición que tiende a utilizar conceptos matemáticos considera la Ingeniería de Sistemas como sinónimo de la teoría de información, teoría de control o análisis de redes eléctricas. Es posible modelar el proceso básico de decisión en cada etapa de la metodología de Ingeniería de Sistemas como un sistema de control o información, lo cual indica que éstas son también solamente técnicas o métodos cuantitativos de la Ingeniería de Sistemas.

Otros definen la Ingeniería de Sistemas como sinónimo de diseño, planeación o administración de un sistema. Estas definiciones son incompletas porque incluyen únicamente una etapa de la metodología.

Vimos que, en general, un sistema es un grupo de elementos interconectados y que normalmente el sistema está rodeado por un ambiente que delimita sus fronteras. La Ingeniería de Sistemas es, parcialmente, un arte porque no existen procedimientos sistemáticos que determinen exactamente, y en todos los casos donde debe trazarse la frontera entre el sistema y su ambiente, cuáles tienen que ser los componentes del sistema, o cuál debe ser el objetivo del problema.

La Ingeniería de Sistemas ha sido relevante en una gran variedad de disciplinas teniendo mucho éxito; sobre todo, en

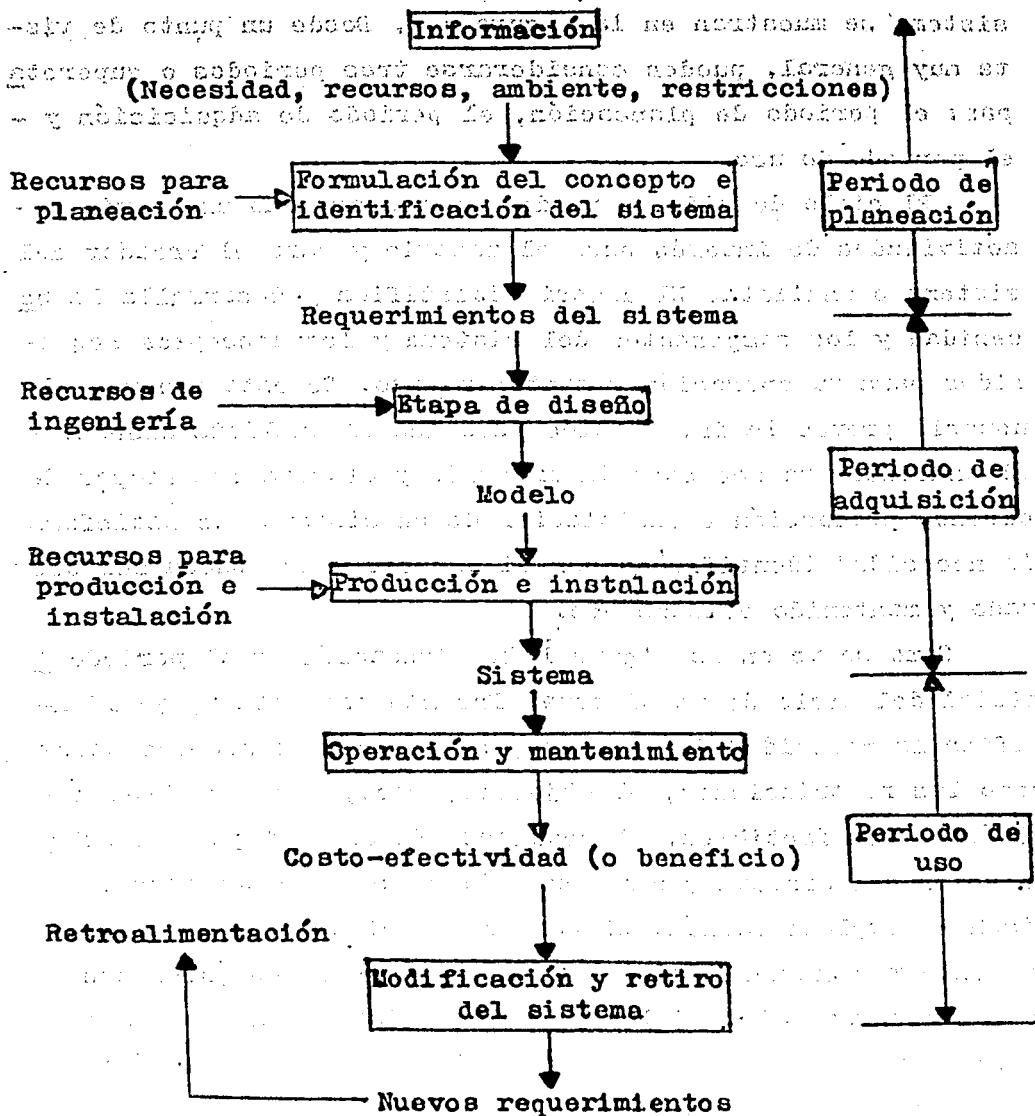


Fig. 1.2 Ciclo de vida de un sistema.

el análisis de sistemas de gran escala, tales como: transporte, planeación urbana, administración y contabilidad, educación, computación, etc.

La contribución más importante de la Ingeniería de Sistemas es, quizá, la gran importancia que da a la identificación de todos los diferentes aspectos o componentes de un sistema permitiendo que el analista pueda criticar y evaluar el problema con más facilidad.

1.1.2. El Ciclo Básico de un Sistema.

Para que un sistema sea útil, debe satisfacer una necesidad; pero el sistema debe diseñarse para satisfacer la necesidad durante todo un periodo, no debe pretenderse cubrir únicamente la necesidad actual; sólo así justificará la inversión de tiempo, dinero y esfuerzo. Por esta razón, el sistema debe ser analizado desde un punto de vista dinámico. El ciclo básico de un sistema comienza con la identificación de una necesidad, y termina cuando el sistema se hace obsoleto.

Cualquier sistema real tiene un ciclo de vida y necesita renovarse periódicamente para no caer en la obsolescencia. Frecuentemente no se completa el ciclo de vida de un sistema por no haberse incluido, durante la planeación original del sistema, suficiente flexibilidad para permitir su máximo desarrollo y uso.

Las fases o etapas generales del ciclo de vida de un --

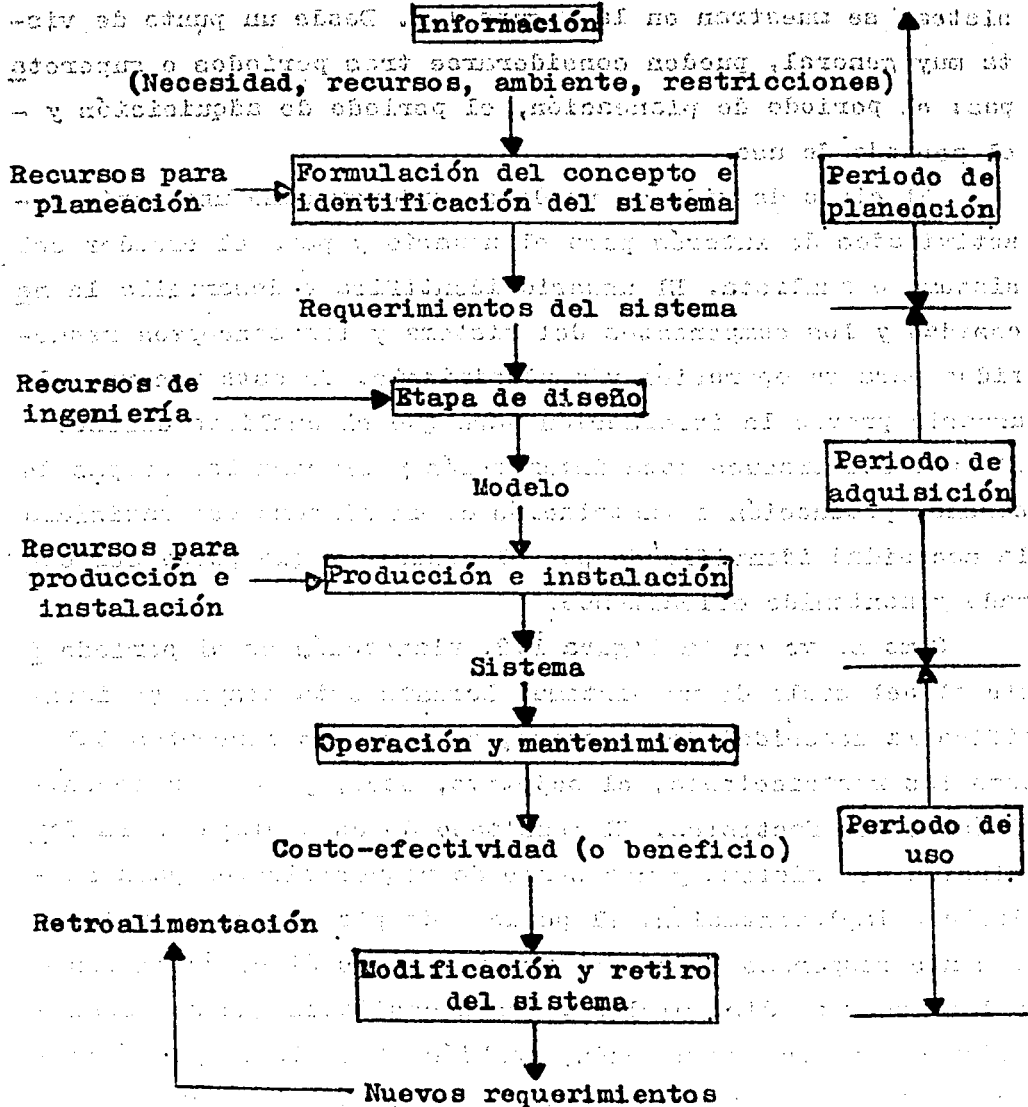


Fig. 1.2 Ciclo de vida de un sistema.

sistema se muestran en la Figura 1.2. Desde un punto de vista muy general, pueden considerarse tres periodos o superetapas: el periodo de planeación, el periodo de adquisición y el periodo de uso.

El ciclo de vida se puede considerar como una serie de actividades de interés para el usuario y para el creador del sistema o analista. El usuario identifica y desarrolla la necesidad y los componentes del sistema y los conceptos requeridos para su operación y mantenimiento. De esta manera, el usuario provee la información para que el analista diseñe. El analista traduce esta información y elabora las etapas de diseño, producción e instalación de un sistema que satisfaga la necesidad identificada por el usuario y que pueda ser operado y mantenido eficazmente.

Como se ve en la figura 1.2, planeación es el periodo inicial del ciclo de un sistema. Durante esta etapa, se identifica la necesidad del sistema, se formulan conceptos tales como las restricciones, el objetivo, etc., y se establecen, si éstos son factibles. El resultado de esta etapa es la formulación del sistema y una serie de requerimientos para su diseño e implementación. El periodo de planeación es principalmente responsabilidad del usuario, pues él es quien conoce los recursos disponibles y las necesidades que se deben satisfacer y, por esta razón, también el indicado para sugerir el sistema óptimo o mejor. El analista, sin embargo, debe trabajar en conjunto con el usuario y traducir a un lenguaje cuantitativo.

El periodo de adquisición comprende todas aquellas eta-

pas que incluyan el diseño, evaluación, producción e instalación del sistema. El período de adquisición es principalmente responsabilidad del analista. El debe transformar los requerimientos definidos durante el período de planeación en un modelo del sistema, el cual se utilizará posteriormente para construir e instalar el sistema.

El período de uso consiste en todas las actividades necesarias para operar y mantener el sistema, incluyendo modificaciones o mejoras periódicas para extender su vida, para satisfacer las necesidades que cambian con el tiempo y finalmente para retirarlo. Una vez más, este período es principalmente de la responsabilidad del usuario. Es así como el ciclo se completa donde comenzó: con el usuario. Esto implica la generación de nuevos requerimientos y el ciclo vuelve a empezar.

Aun cuando se diga que la Ingeniería de Sistemas abarca el ciclo de vida de un sistema en su totalidad, más bien --- tiende a enfatizar el período de planeación y la etapa de diseño del período de adquisición.

Inicialmente el período de planeación ocupa información sobre la necesidad que se quiere satisfacer con el sistema, los recursos disponibles, el ambiente alrededor del sistema y las restricciones. Esta información inicial define las --- fronteras del sistema. A continuación sigue la etapa en la cual se identifica y se evalúa el modelo. Durante esta etapa es muy importante hacer consideraciones tales como la efi--- ciencia del sistema. Esta etapa puede dividirse en tres subetapas: una primera subetapa en la cual se determine cuál es-

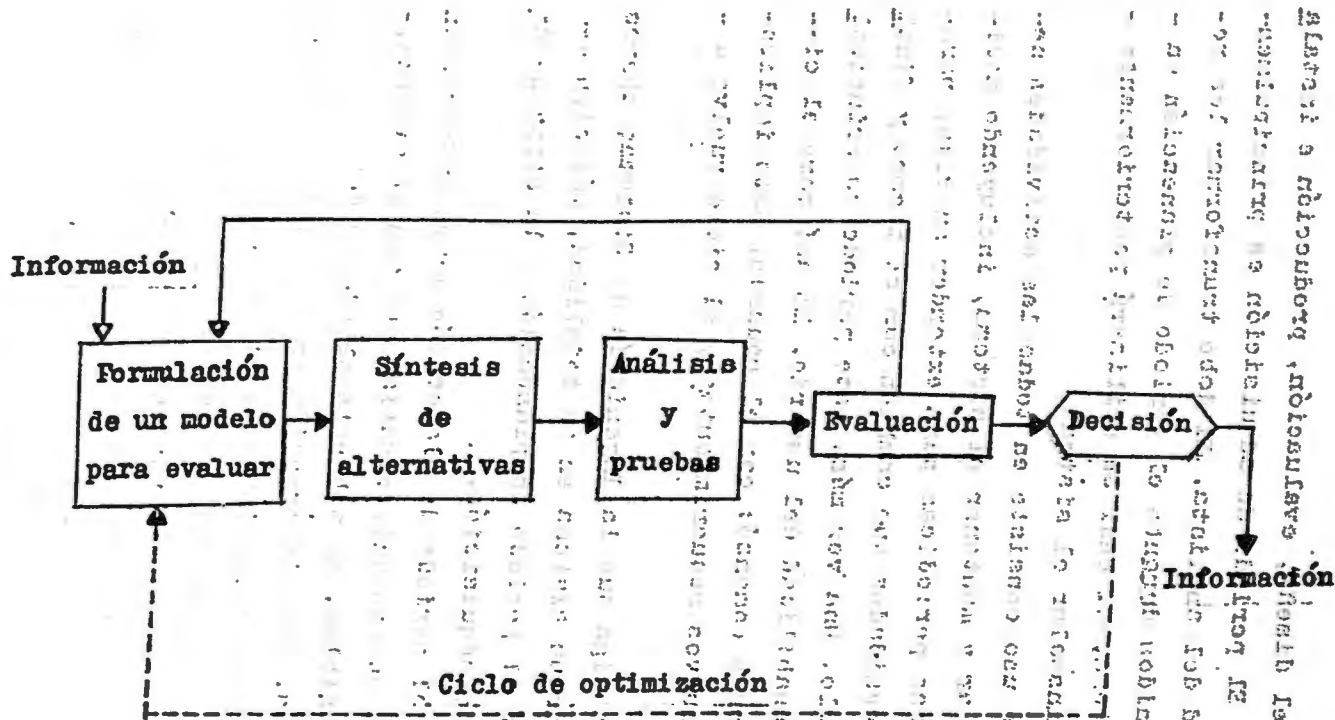


Fig. 1.3 Proceso básico de decisión.

El procedimiento que se debe seleccionar para satisfacer las restricciones, el objetivo, etc., del sistema; una segunda subetapa en la cual se defina cuál es la mejor forma de implementar esta metodología; y una tercera subetapa en la cual se determine si se justifica la extensión y la modificación de esa metodología.

Por otro lado, cada etapa del ciclo completo de un sistema se implementa utilizando el "proceso básico de decisión" que se encuentra representado en la figura 1.3. La "entrada" a este proceso es la información necesaria para identificar y definir un modelo. Esta información se obtiene de investigaciones y decisiones hechas en etapas anteriores y experiencia previa. El producto o "salida" de este proceso brinda información más detallada, organizada y exacta de los requerimientos del sistema óptimo para la etapa. La implementación de este "proceso básico de decisión" genera un diseño. Este diseño consiste, durante los periodos de planeación y adquisición, en la identificación, descripción, producción e instalación del sistema óptimo; durante el periodo de uso, el diseño incluye la identificación de las mejores tácticas para operación y desarrollo del sistema.

1.1.3 Características importantes de la Ingeniería de Sistemas.

Al mismo tiempo que la filosofía de Ingeniería de Siste

mas se han desarrollado muchas metodologías, algoritmos, técnicas, etc., que existen en la actualidad. Realmente lo nuevo u original de la Ingeniería de Sistemas son técnicas generales de descomposición, identificación de parámetros, simulación, programación matemática y otras.

Probablemente una de las contribuciones más importantes de la Ingeniería de Sistemas de hoy en día es la tendencia a cuantificar el valor de las alternativas, componentes o soluciones del problema. El uso de modelos matemáticos obliga al analista a comparar alternativas bajo un criterio o medida de valor común. Por ejemplo, en el caso de planeación de carreteras, el beneficio de construir una supercarretera o en su lugar, una carretera de terracería y una vía de ferrocarril entre dos poblaciones, deberá ser cuantificado antes de tomar una decisión. También pueden expresarse como restricciones en el modelo los factores políticos reales que existan; y con frecuencia, entre más restricciones haya, más fácil es encontrar el óptimo ya que dichas restricciones reducen el número de posibles soluciones del problema; claro que esto depende del tipo de problema que se trate. En Investigación de Operaciones, el conjunto de posibles soluciones de un problema se llama "espacio de soluciones factibles". En un problema de gran escala, donde normalmente existen muchas soluciones del mismo, ese espacio factible es muy extenso y complejo. Cuando no existen reglas manuales o teoremas para reducir sistemáticamente este espacio; la computadora es útil, pues nos evita una selección exhaustiva entre todas las alternativas.

Aun cuando la computadora es la herramienta principal para obtener resultados numéricos en estudios de sistemas complejos, no significa que ésta deba utilizarse en todas las aplicaciones de Ingeniería de Sistemas. Debe estudiarse el problema a fondo para determinar si el valor de los resultados numéricos justifica el costo de utilizar la computadora.

Muchas personas identifican la Ingeniería de Sistemas con el uso de computadoras para procesar información. Es cierto que una computadora es un sistema y que se diseñó desde un punto de vista de sistemas, analizando los componentes e interacciones entre los mismos. No obstante, el hecho de que ciertas funciones en un hospital, compañía o agencia gubernamental estén conectadas a través de un sistema de información controlado por una computadora, no quiere decir que la organización esté utilizando Ingeniería de Sistemas para resolver sus problemas. Una cosa es el empleo de una computadora y otra, el uso general de la Ingeniería de Sistemas.

La tendencia actual de la Ingeniería de Sistemas es la resolución de problemas de gran escala; o sea, de problemas que constan de muchos componentes, frecuentemente difíciles de identificar y altamente interconectados. El beneficio de sistematizar o estructurar los procedimientos para llegar a tomar decisiones en este tipo de problema, generalmente es mayor que el correspondiente a los casos menos complejos donde de varias alternativas y características del sistema son inclusive obvias. En muchos casos, simplemente se aplica la metodología de la Ingeniería de Sistemas y se usan sistemática

mente técnicas clásicas tales como probabilidad y estadística; en otros casos, es necesario utilizar técnicas nuevas tales como la Investigación de Operaciones.

En cierta forma los métodos o ideas de la Ingeniería de Sistemas van contra los procedimientos empleados por mucho tiempo en ciertos círculos industriales y gubernamentales. Popularmente se emplea a una persona de mucha experiencia, intuición e inteligencia para ocupar puestos ejecutivos. Este sujeto, tradicionalmente, examina varios aspectos de su organización o sistema, obtiene datos e informes de su staff y decide después lo que hay que hacer mediante un procedimiento intuitivo.

Este es un procedimiento "antisistemas", pues una sola persona no siempre puede explicar cuantitativamente y explícitamente por qué tomó ciertas decisiones. La sistematización de procedimientos de decisión tiende generalmente a elaborar un sistema independientemente de una persona en particular.

La idea antisistemas o antiplanificación es una realidad; el método pragmático que utiliza la experiencia, la intuición, etc., se opone al método "analítico" de la Ingeniería de Sistemas.

Un escéptico cree que nunca se pueden entender todos los aspectos de un problema complejo, y a veces ni los más importantes. Por esta razón, juzga que todo lo relativo al análisis de sistemas es un mito y un ejercicio intelectual sin futuro práctico. Acepta que se pueden cambiar elementos que pertenezcan a los subsistemas, pero nunca se optimiza el

sistema completo por no conocer todos sus componentes. Este tipo de persona es un extremista, desde el punto de vista de sistemas. Si bien es cierto que muchos sistemas son muy complejos y que su óptima solución jamás se podrá encontrar; la meta no es siempre obtener la solución óptima, sino encontrar un balance entre una buena solución y el costo de obtenerla.

Por otro lado, un determinista piensa que el hombre no tiene control sobre las fuerzas que mueven al mundo real. -- Por esto afirma que varias de las etapas del ciclo de vida de un sistema, sobre todo los periodos de planeación y adquisición, son un juego de adivinanzas, porque se utilizan ciertas suposiciones sobre el futuro del sistema y de su ambiente. Esta persona también es extremista, pues se pueden modificar las proyecciones del futuro a medida que pasa el tiempo.

Existen muchos otros argumentos en contra de la filosofía de sistemas y la implementación de su metodología en la vida práctica. A pesar de esto, la Ingeniería de Sistemas está revolucionando la manera de analizar y resolver problemas en casi todas las profesiones, incluyendo las ciencias sociales.

A pesar de que la Ingeniería de Sistemas teóricamente abarca todo el ciclo de vida de un sistema real, en la vida práctica el ingeniero de sistemas es un asesor que hace sugerencias al que tiene la responsabilidad de tomar decisiones (gerente, director, gobernante, etc.). Las etapas de adquisición y uso del sistema únicamente se llevarán a cabo si lo --

desea la persona responsable. Parte de la función del ingeniero de sistemas es la de convencer que las ideas que sugiere se tomen en cuenta. Por lo que es esencial que el ingeniero de sistemas presente la solución del problema en términos tales que el gerente o gobernante pueda entenderla.

Además, un ejecutivo de una organización grande jamás tendrá el tiempo de aprender todos los detalles del modelo y de los algoritmos desarrollados por el ingeniero de sistemas para resolver el problema, resultando imperativo que se documente el estudio de tal manera que el encargado de tomar la decisión no tenga que conocer todos los detalles técnicos; sin embargo, esta persona debe entender los parámetros críticos del modelo, sus ventajas y desventajas. Es importante también mencionar que muchas veces los objetivos de un sistema cambian, por lo que la adaptabilidad y flexibilidad del modelo y algoritmos son de suma importancia en tales casos.

Cabe asimismo hacer notar que la Ingeniería de Sistemas no está diseñada para reemplazar las filosofías y técnicas clásicas que anteriormente se utilizaban para tomar decisiones. La Ingeniería de Sistemas viene a estructurar el uso de una serie de técnicas y herramientas clásicas y de algunas nuevas con el propósito de ayudar a quien toma las decisiones a satisfacer sus objetivos más eficientemente.

1.1.4 La Ingeniería de Sistemas ante la toma de decisiones.

La Ingeniería de Sistemas se relaciona directamente con la toma de decisiones porque es una ciencia y un arte; ambos aspectos son igualmente importantes para el análisis del proceso de tomar decisiones. Una técnica estrictamente sistemática o matemática, o una estrictamente cualitativa, jamás podrá incluir todos los aspectos complejos de tomar decisiones en general, pues dichos aspectos incluyen factores tangibles, intangibles, conocidos, desconocidos, etc. El enfoque de sistemas trata de incluir todos estos aspectos cuando enfatiza la representación cuantitativa de los mismos, así como de sus interrelaciones.

La manera de pensar que utiliza el concepto de "sistemas" es una filosofía que se enfoca al análisis y estructuración de los diversos componentes o subsistemas del problema antes de tratar de resolverlos. Esto se opone a la manera común de atacar un problema que desde un principio toma los aspectos ya conocidos o "naturales" del sistema, trata de resolverlos y luego hace lo mismo con los otros componentes o aspectos menos obvios de los sistemas.

El ingeniero de sistemas no pretende ser un planificador, un científico o un filósofo, simplemente trata de implementar la filosofía general de sistemas utilizando técnicas cuantitativas para satisfacer un objetivo bien definido y formulado en cooperación con el usuario. Requisitos necesarios para ser efectivo, como en toda profesión, son experiencia y conocimientos de la materia; pero en este caso, no se resuelven problemas de cierto tipo ni en cierta área. La Ingeniería de Sistemas posee un carácter interdisciplinario, -

lo cual sugiere que la Ingeniería de Sistemas no es una especialidad, sino una generalidad; pues cada vez que se resuelve un problema, se aprende algo de una nueva disciplina o profesión. Además, las técnicas de la Ingeniería de Sistemas son tan numerosas y tan amplias, que cada aplicación proporciona nuevos conocimientos sobre ellas.

Existen muchas interpretaciones, definiciones y usos de la mayoría de los conceptos de la Ingeniería de Sistemas. Es posible que esté ocurriendo el mismo tipo de fenómeno que aconteció en la década de 1950-1960 cuando Norbert Wiener planteó el concepto de la "Cibernética", o en la década de 1960-1970 cuando surgió la idea de la "Electrónica". Ambos conceptos impactaron fuertemente al mundo, que aun los medios masivos de comunicación (revistas, radio, etc.) se ocuparon de ellos, con la distorsión consecuente de muchos de los beneficios y aplicaciones reales de esas disciplinas.

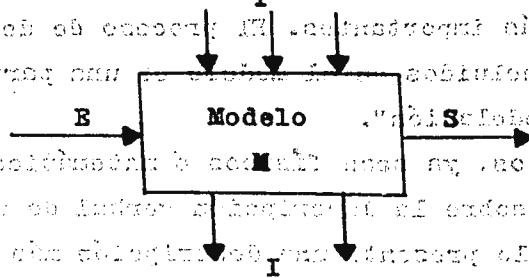
En la actualidad, la palabra "sistemas" tiene un magnetismo tal, que tanto las críticas como las dudosas cualidades que se le atribuyen, son laudables si a su interpretación misma se aplica el enfoque de sistemas.

1.2 MODELOS.

El paso siguiente, posterior a la formulación del problema e identificación de las posibles soluciones que las restricciones permitan considerar, es decir, que sean facti-

plano; consiste en formular en etapas de nuevo el problema para poderlo
 analizar más fácilmente. Con esta finalidad, la Ingeniería de Sistemas
 de Control de un sistema de control automático se puede considerar como
 un proceso de solución de problemas que se realiza en etapas sucesivas.

En primer lugar, se debe definir el problema que se desea resolver, esto es, se debe
 establecer el objetivo del sistema y las condiciones de operación. Después de esto,
 se debe seleccionar el tipo de sistema que se desea utilizar, esto es, se debe
 elegir el tipo de controlador y el tipo de actuador. Una vez que se ha
 seleccionado el tipo de sistema, se debe diseñar el sistema, esto es, se debe
 determinar los parámetros de diseño y las características de operación.
 Finalmente, se debe implementar el sistema, esto es, se debe construir el sistema
 físico y ponerlo en operación. Este proceso se puede representar mediante el
 siguiente diagrama:



Donde E_i (entrada) representa los datos, variables, etc., --
 que el sistema requiere (recursos); S_o (salida) que el sistema
 produce (controlada por el analista) que afecta a S_i (salida) que
 representa el resultado o producto del modelo (el objetivo del sistema); I_i (internas) que
 representan todas aquellas variables internas al sistema. P_i (perturbaciones) que
 representan las perturbaciones que afectan al sistema.

Fig. 1.4 Modelo de un sistema.

bles; consiste en formular de nuevo el problema para poderlo analizar más fácilmente. Con esta finalidad, la Ingeniería de Sistemas se auxilia de "modelos".

Mencionamos anteriormente que un modelo es una representación simplificada de la realidad y que, por lo tanto, no puede incluir todos los aspectos de un sistema real, sino solamente los más importantes. El proceso de decidir cuáles de ellos serán incluidos en el modelo es una parte del arte y ciencia de "modelación".

Los modelos, ya sean físicos o matemáticos, tienen muchas ventajas sobre la descripción verbal de un problema. Dado que un modelo presenta una descripción más concisa, el analista puede comprender con más facilidad la estructura del problema, permitiéndole identificar qué datos adicionales se necesitan para el análisis completo del mismo.

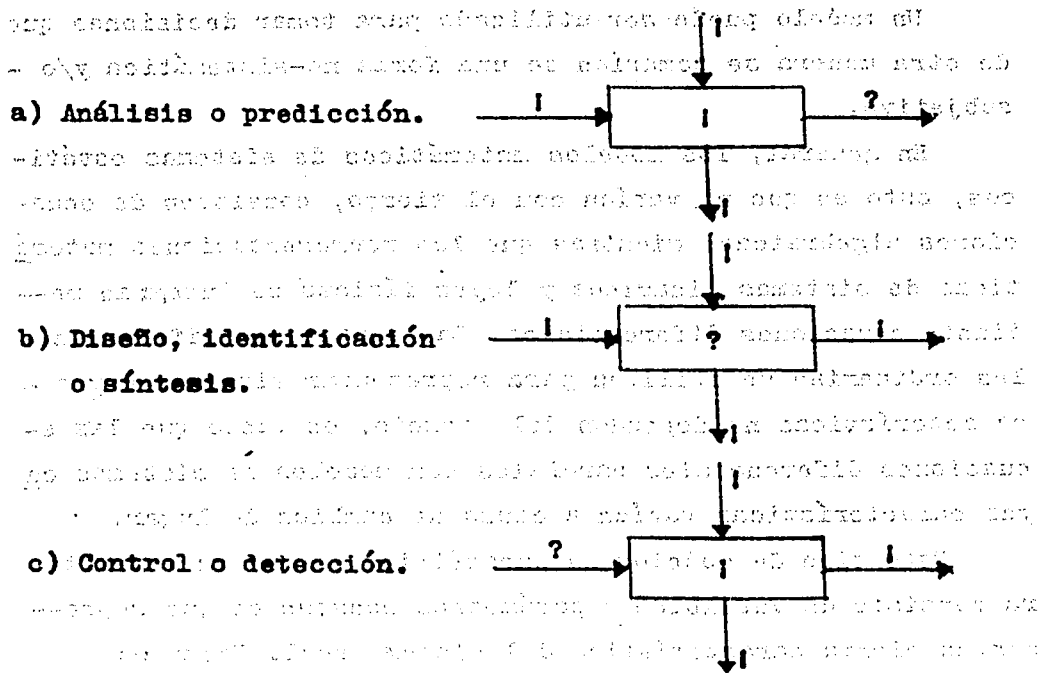
En la actualidad, la importancia de la Ingeniería de Sistemas radica en la representación matemática de sistemas físicos y no el uso de modelos físicos.

Un modelo debe ser bastante detallado si se desea representar válidamente el problema real. Consideremos que el sistema puede ser representado como se ve en la figura 1.4.

El objetivo es establecer buena correlación entre la predicción del modelo de eventos futuros (S) y los eventos futuros que realmente ocurran.

1.2.1 Clasificación y descripción de modelos.

-de En general existen tres clases de problemas que pueden ser considerados por el ingeniero de sistemas: como se ve en el



(I significa "conocido"; ? significa "incógnito").

El problema de análisis puede tener como objetivo encontrar la mejor combinación de variables E, P e I para maximizar S (objetivo típico de problemas de optimización), o simplemente describir la manera como estas variables afectan el valor de S (típico de simulación).

Si se conocen E, P, I y S, el problema es de diseño, identificación o síntesis del modelo.

Finalmente, el problema de control puede tener como objetivo el encontrar el valor de u necesario para obtener un cierto S deseado.

Un modelo puede ser utilizado para tomar decisiones que de otra manera se tomarían de una forma no-sistemática y/o subjetiva.

En general, los modelos matemáticos de sistemas estáticos, esto es que no varían con el tiempo, consisten de ecuaciones algebraicas; mientras que las representaciones matemáticas de sistemas dinámicos y leyes físicas se integran mediante ecuaciones diferenciales. Las ecuaciones diferenciales ordinarias se utilizan para representar sistemas cuyas características no dependen del espacio, en tanto que las ecuaciones diferenciales parciales son modelos de sistemas cuyas características varían a causa de cambios de lugar.

Este tipo de modelos es paramétrico porque su estructura consiste de variables y parámetros constantes que representan cierta característica del sistema real. Ejemplo:

$$AX + BX + CX + 5 = Y \quad \text{donde } A, B, C, \text{ son parámetros} \\ \text{y } X, Y \text{ son variables.}$$

El problema de identificación de parámetros en modelos paramétricos consiste en determinar el valor de los parámetros para que el comportamiento del modelo sea lo más similar posible al sistema real y en obtener una relación entre los parámetros y ciertas características físicas del sistema, generalizando de este modo el modelo.

Por otro lado, existen modelos no-paramétricos, los cuales hacen uso de funciones continuas que representan el comportamiento del sistema real. Aquí, el problema consiste en identificar la función apropiada.

Algunas técnicas que se utilizan en la identificación de parámetros u otras características de un modelo son:

1. Análisis regresivo: con transformaciones lineales y no lineales se puede aplicar a modelos paramétricos simples y estáticos: $y = ax + b$.
2. Técnicas adaptativas: se pueden aplicar a modelos lineales, dinámicos y no-paramétricos.
3. Análisis de correlación: se puede aplicar a modelos lineales, dinámicos y no-paramétricos.
4. Expansiones en Series Volterra: se pueden aplicar en modelos no lineales, dinámicos y no-paramétricos.
5. Cuasilinealización: se puede aplicar a modelos no lineales, dinámicos y paramétricos.
6. Simulación y análisis de perturbaciones: se pueden aplicar a modelos complejos, tanto deterministas como estocásticos, en donde E y S tienen muchos elementos.

Hay muchas formas de evaluar un modelo. Tal evaluación debe incluir tres aspectos importantes: costo, seguridad y alguna medida de "efectividad" o "utilidad".

Los principales costos son los de operación y desarrollo del modelo y recopilación de datos. En la mayoría de los casos, entre más datos requiera la construcción de un modelo,

más caro, pero más seguro será el modelo final. La habilidad de un modelo para producir soluciones aceptables bajo una variedad de perturbaciones, condiciones iniciales, etc., es una medida de la seguridad del mismo. A veces, el modelo es adecuado para fines de planeación y estudios de operación, pero inadecuado para diseño. Los objetivos del estudio deben ser reconsiderados para determinar si el uso de ese modelo es compatible con los objetivos deseados.

La importancia de construir modelos adaptativos con suficiente flexibilidad para incorporar cualquier cambio del ambiente, predecible o no, o del sistema físico, es el otro aspecto importante en la evaluación de modelos.

Uno de los obstáculos más serios para la evaluación puede ser la falta e inexactitud de datos. Para resolver este problema se buscan formas de simular o generar datos utilizando la mayor información posible derivada del usuario, de otros modelos similares, etc.

Esta contrariedad es fundamental y muy importante en la evaluación de modelos aplicados a los sistemas de transporte porque generalmente se carece de datos exactos y suficientes para llevar a efecto la planeación de estos sistemas. Por ejemplo, no es posible saber con toda exactitud el número de vehículos que transitarán por una carretera que todavía no ha sido construida, ni el número preciso de pasajeros que harán uso de las instalaciones de un aeropuerto que pretendamos planear. En estos casos la simulación y generación de datos es indispensable y de vital importancia.

Por otro lado, si los datos existen deben estar almacenados de manera apropiada para su aplicación (gráficas, tablas, reportes, computadora, etc.).

Para desarrollar la habilidad de formular modelos, los conceptos siguientes son útiles:

Primero. Es necesaria la construcción de modelos como un proceso adaptativo y evolutivo. Se comienza con modelos de los simples, alejados de la realidad, y luego se modifican con el propósito de incrementar, sucesivamente, los aspectos importantes del problema.

Segundo. Es muy útil hacer analogías con estructuras lógicas o modelos ya desarrollados (incluso para problemas que no son similares) para poder identificar el punto inicial del proceso adaptativo o de evolución del modelo que se va a seguir.

Tercero. El proceso evolutivo de modelación incluye por lo menos dos tipos de procedimientos iterativos:

1. Es necesario que se alterne entre la modificación del modelo y su evaluación o prueba mediante la utilización de datos. Cada vez que se prueba el modelo, se obtiene una nueva versión que requiere una nueva evaluación.

2. Hay que alternar entre la exploración de nuevos métodos para obtener el objetivo junto con cada versión del modelo y las suposiciones que se hicieron para obtenerlo. Si el modelo se puede re-

... resolver, se agrega más complejidad; si no se puede
 ... de resolver, entonces se purifica y simplifica
 el modelo. (esto, sobre todo, en el caso de los modelos de
 ... para desarrollar la habilidad de analizar y sintetizar
 ... con técnicas de análisis)

1.2.2 El Proceso de Decisión.

... en el caso de sistemas de decisión de tipo determinístico
 ... de decisión de tipo estocástico y optimización de
 ... La utilidad de la Ingeniería de Sistemas radica en que
 ayuda a identificar los elementos básicos que se emplean al
 tomar una decisión, ayuda a analizar los requerimientos y
 restricciones y propone también un procedimiento para tomar
 decisiones basado en esos requerimientos y restricciones.

El elemento primario en cualquier situación donde se de
 ba hacer decisiones queda representado por la persona o gru-
 po de personas que tienen la autoridad y responsabilidad de
 seleccionar la alternativa que se va a implementar. Un mode-
 lo general de la información requerida para tomar cualquier
 decisión se ilustra en la figura 1.5. Primero, es necesario
 conocer todas las alternativas factibles para resolver el
 problema (a_1). Después, hay que conocer las variadas condi-
 ciones del ambiente con las que la persona autorizada de to-
 mar la decisión se pudiera enfrentar.

Las consecuencias asociadas con la selección e implemen-
 tación de una alternativa " a_1 ", comenzando por un estado de
 ambiente " s_k ", se llamará un "producto" (u_{1k}). La "utilidad"
 de este producto es una medida de la contribución del produc-
 to al éxito de la misión, la satisfacción de la necesidad u-

Modelo de decisión.

	s_1	s_2	s_3	...	s_k	...
a_1	u_{11}	u_{12}	u_{13}	...	u_{1k}	...
a_2	u_{21}	u_{22}	u_{23}	...	u_{2k}	...
a_3	u_{31}	u_{32}	u_{33}	...	u_{3k}	...
...
a_i	u_{i1}	u_{i2}	u_{i3}	...	u_{ik}	...
...

Definiciones:

- (a_i) = grupo de soluciones factibles del problema (estrategias);
- (s_k) = grupo de estados factibles del ambiente;
- (p_k) = grupo de medidas probabilísticas de (s_k) ;
- (u_{ik}) = el resultado de haber implementado la alternativa (a_i) cuando se comenzó en el estado (s_k) ; con probabilidad (p_k) .

Fig. 1.5 Modelo de decisión mediante el uso de probabilidades.

objetivo. Cabe mencionar que la relación entre utilidad pura de un producto y las medidas de valor comúnmente usadas frecuentemente no es lineal, por lo que siempre se requiere usar una escala de utilidad general para determinar el valor de cualquier producto de una decisión.

En resumen, los dos elementos básicos del procedimiento para tomar decisiones son: 1) información y 2) valor (se emplea la teoría de utilidad para su análisis). El ingeniero de sistemas necesita tomar decisiones en cada etapa del ciclo de vida de un sistema y su objetivo debe ser la identificación de estos dos elementos antes de tomar cualquier decisión.

Una vez identificada la mejor solución o alternativa, el ingeniero de sistemas debe convencer al usuario para que esa decisión sea implementada.

Un elemento muy importante en el procedimiento de tomar decisiones es el juicio humano. El procedimiento básico de decisión no es más que una herramienta para obtener y satisfacer deseos o necesidades humanas que son fundamentalmente subjetivos. El proceso de tomar decisiones asocia cierto riesgo y/o incertidumbre con cada alternativa posible, siempre que se dé un ambiente específico. Este riesgo y/o incertidumbre es esencialmente subjetivo también. Por estas razones no se puede excluir el juicio humano del proceso de tomar decisiones.

Pueden considerarse cinco posibles situaciones en las cuales ciertos elementos se presentan explícita y cuantitativamente (véase la tabla 1.1).

DIFERENTES NIVELES EN LOS CUALES SE PUEDE UTILIZAR EL JUICIO HUMANO

Situación	Elementos explícitos adicionales a los anteriores	Elementos implícitos	Nivel de juicio	Identificación de la mejor alternativa
Una	<ul style="list-style-type: none"> • Problema 	<ul style="list-style-type: none"> • Alternativas de solución • Estados de ambiente • Productos • Utilidad de los productos • Probabilidades de los estados • Utilidad de las alternativas 	Problema global	A través del humano
Dos	<ul style="list-style-type: none"> • Alternativas de solución 	<ul style="list-style-type: none"> • Estados de ambiente • Productos • Utilidad de los productos • Probabilidades • Utilidad de las alternativas 	Alternativas factibles de decisión	A través del humano
Tres	<ul style="list-style-type: none"> • Estados de ambiente • Productos 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilidad de los productos • Probabilidades de los estados • Utilidad de las alternativas 	Productos	A través del humano
Cuatro	<ul style="list-style-type: none"> • Utilidad de los productos • Utilidad probabilística de las diferentes alternativas 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilidad de diferentes criterios o medidas de valor para cada producto 	Utilidad de los diferentes productos	A través de la computadora
Cinco	<ul style="list-style-type: none"> • Funciones probabilísticas de los criterios • Funciones de utilidad para cada medida de valor de cada producto 	(Ninguno)	Utilidad de cada criterio o medida de valor para cada producto	A través de la computadora

Tabla 1.1

Situación 1: El que toma decisiones, consciente de un problema, subjetiva e intuitivamente considera diversos estados posibles del ambiente, medidas probabilísticas de los diferentes productos factibles y la utilidad de los mismos; luego selecciona la alternativa que se debe implantar. Ninguno de los elementos de decisión es explícito y claro, se aplica el juicio humano a nivel del "problema completo".

Situación 2: El que hace decisiones se encuentra con un número explícito de alternativas factibles de decisión. Los estados del ambiente, los posibles productos, sus probabilidades y utilidades, se manipulan subjetivamente y luego se toma una decisión. En esta situación se utiliza juicio humano hasta el nivel de las "alternativas factibles".

Situación 3: Se conoce una lista explícita de posibles alternativas de decisión, estados de ambiente y productos. El responsable de decidir asigna intuitivamente utilidades y probabilidades y manipula subjetivamente estos factores con el objeto de llegar a una decisión. Se aplica el juicio hasta el nivel de los "posibles productos del ambiente".

Situación 4: Se estipulan explícita y cuantitativamente las alternativas, estados de ambiente, sus probabilidades y los productos posibles. Se utiliza el juicio para determinar la utilidad asociada con productos de ambiente multidimensionales. En este caso la mejor alternativa se puede identificar calculando explícitamente el costo relativo asociado con cada alternativa.

Situación 5: Se identifican explícitamente los estados de ambiente y los criterios o medidas de valor de cada pro--

ducto. Además se conoce la utilidad asociada con cada medida de valor. El juicio humano es aplicado a nivel de criterio de valor utilizado. Por lo tanto, se puede asignar la utilidad de cada una de las alternativas factibles antes de sintetizarlas o calificarlas; la mejor alternativa se podrá entonces identificar calculando explícitamente el costo relativo de todas las alternativas, una vez que se haya estudiado cada alternativa factible y la probabilidad asociada con cada producto del ambiente.

Las actividades requeridas para generar la información representada en la figura 1.5 son muy costosas cuando se trata de tomar decisiones relacionadas con la planeación, diseño y operación de sistemas complejos. Para las actividades de identificación de los estados de ambiente pertinentes, la síntesis y el análisis de las alternativas factibles, se requiere del empleo de personal muy costoso durante extensos periodos. En estas condiciones, el problema consiste en optimizar el proceso total de decisión.

En la mayoría de los casos el elemento humano tiende a basar sus decisiones en un número muy limitado de variables y a ignorar las aportaciones de los factores restantes.

En el problema general, el juicio humano se debe aplicar a nivel de "criterio o medida de valor" individual. Entonces se podrán evaluar explícitamente los productos asociados con cada alternativa " a_1 ". La relación entre el criterio o medida de valor del producto " y_j " y la utilidad de éste, se puede representar por una "función de utilidad". Puesto que la utilidad depende, tanto del criterio " y_j " como del es

tado del ambiente "s_k", es necesario que exista una función de utilidad para cada criterio bajo "s_k". Esta función se puede representar como U(y_j)_k. La situación general de decisión requiere, entonces, una matriz de funciones de utilidad, como la presentada en la figura 1.6.

Resumiendo: antes de que se pueda tomar una decisión es necesario identificar tres elementos o características básicas:

- a) Se necesita de la medida de valor "clásica" (sea velocidad, costo, distancia o beneficio) para describir el atributo del sistema que esté más íntimamente relacionado con las metas y objetivos del problema.
- b) Se necesita una medida de valor probabilística para representar cuantitativamente el valor de la posibilidad de los diferentes productos factibles.
- c) Se requiere también una medida de utilidad "u₁" para relacionar la medida de valor de cada producto posible con su contribución directa a la satisfacción de los objetivos del problema.

Posteriormente, se puede obtener la alternativa óptima "a₁" combinando la información de u(y_j)_k, f(y_j)_{ik}, s_k, p_k en una medida de valor numérica.

$$u_1 = U \left\{ \left[u(y_j)_k \right], \left[f(y_j)_{ik} \right], \left[p_k \right] \right\} = \left\{ \text{valor relativo de la alternativa } a_1 \right\}$$

		Estado de ambiente		(s_k) y su medida de probabilidades $\{p_k\}$		
		s_1	s_2			
		p_1	p_2			p_k
Criterios o medidas de valor $\{y_j\}_n$	y_1	$u(y_1)_1$	$u(y_1)_2$			$u(y_1)_k$
	y_2	$u(y_2)_1$	$u(y_2)_2$			$u(y_2)_k$

	y_j	$u(y_j)_1$	$u(y_j)_2$			$u(y_j)_k$
.
.

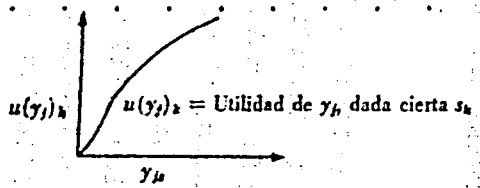


Fig. 1.6 Matriz de funciones de utilidad

donde $U \{ \}$ implica una "función U de".

La expresión anterior es la función objetivo que se deberá maximizar con la decisión que escoja la mejor " a_1 ".

El estudio de los métodos para efectuar un análisis de decisiones consistente será presentado posteriormente, en la sección 1.3.3.

1.3 TECNICAS DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS.

Las matemáticas aplicadas influenciaron desde el siglo XVII la evolución de la Investigación de Operaciones. Lagrange desarrolló la teoría de multiplicadores; Euler, el cálculo de variaciones; Gauss, el método de mínimos cuadrados y la teoría de control; etc.

Durante los siglos XVIII y XIX surgieron nuevas contribuciones encaminadas a integrar el grupo de técnicas cuantitativas, ahora identificadas como "Investigación de Operaciones".

En 1908, el investigador Erlang desarrolló la teoría de colas o líneas de espera. En 1915, Lanchester desarrolló varios modelos de organización militar, precursores de la simulación. Posteriormente, J. Von Neuman elaboró una serie de publicaciones sobre la teoría de juegos, estadística, optimización (por ejemplo, el concepto de dualidad en 1974), etc.

De 1930 a 1950, Kantorovich publicó las bases para el estudio sistemático del problema de la asignación económica-

de recursos. En 1948, Shannon presentó su publicación clásica sobre la teoría de información. Y en 1945, se construyó en la Universidad de Pennsylvania (E.B.U.U.) la primera computadora electrónica.

La aplicación de la Investigación de Operaciones tuvo su auge durante la Segunda Guerra Mundial en la planeación, diseño y operación de sistemas militares complejos. Debido al éxito obtenido, después de la guerra se inició la aplicación de esas técnicas en la resolución de complejos problemas técnicos y administrativos. Asimismo, los investigadores continuaron desarrollando técnicas y procedimientos más numerosos. En 1947, Dantzig y asociados desarrollaron el concepto de "programación lineal"; en 1955, Bellman presentó la técnica de "programación dinámica"; en ese mismo año, Dantzig, Fulkerson y Johnson desarrollaron la "programación entera". Más tarde, aparecieron la "programación geométrica", los métodos de "gradiente" y demás técnicas de "programación no lineal". Luego evolucionaron varios modelos y métodos de redes para planeación y control de actividades.

El desarrollo de las computadoras digitales contribuyó enormemente a la implementación de la Investigación de Operaciones, especialmente en problemas complejos, puesto que muchos de los procedimientos y métodos de la Investigación de Operaciones son iterativos y generalmente exigen un gran número de cálculos para llegar a la solución final.

En la actualidad el número y la variedad de aplicaciones de la Investigación de Operaciones en organizaciones militares, industriales y gubernamentales es impresionante. In

dustrias tales como la automotriz, eléctrica, minera, electrónica, petrolera, de transporte, comunicaciones, etc., y ya han gozado muchos de los beneficios de esta disciplina.

La Investigación de Operaciones se podría definir como un método cuantitativo útil para tomar decisiones y que requiere que la organización y operación del sistema sean investigados. Sin embargo, esta definición es tan general, que podría aplicarse a muchas otras disciplinas, por lo que resulta más conveniente examinar las características importantes de la Investigación de Operaciones.

La Investigación de Operaciones puede clasificarse como las técnicas cuantitativas de la Ingeniería de Sistemas. La Investigación de Operaciones se emplea principalmente en el aspecto de coordinación de operaciones y actividades dentro de la organización o sistema que se analice, mediante el uso de modelos matemáticos que describan las interacciones entre los componentes del sistema. La Investigación de Operaciones tiende a representar el problema cuantitativamente para poderlo analizar y evaluar bajo un criterio común. Por esta razón, el uso de las matemáticas es su característica principal.

No existen expertos en Ingeniería de Sistemas y como la Investigación de Operaciones es tan amplia, resulta imposible encontrar una persona que conozca todo lo relacionado con todas las técnicas de esta disciplina. Un estudio ideal en Investigación de Operaciones requiere un grupo de individuos poseedores de diversas cualidades y preparación que trabajen en conjunto. Un grupo compuesto por personas entrena-

das en estadística, matemáticas, economía, comercio, ciencias sociales y en las técnicas específicas de la Investigación de Operaciones. Por otra parte, la Investigación de Operaciones no es solamente matemáticas, también es necesario comprender los aspectos físicos del sistema que se estudia.

Importantes contribuciones de la Investigación de Operaciones son, en general:

- 1) La transformación de una situación real a un modelo matemático; quedando incluidos los elementos esenciales para la obtención de una solución que esté de acuerdo con los objetivos fijados;
- 2) La sistematización de procedimientos para resolver problemas; y
- 3) La búsqueda de soluciones "óptimas" con respecto a una función objetivo.

Por otro lado, se acepta que las seis fases principales de un estudio de Investigación de Operaciones son: la formulación del problema; la construcción del modelo matemático, el desarrollo de un procedimiento para obtener una solución, pruebas y evaluación del modelo y sus soluciones; análisis de perturbaciones en el modelo y la implementación del resultado.

La mayoría de los problemas prácticos se comunican al grupo de Investigación de Operaciones en una forma vaga, general e inexacta. El primer trabajo del investigador de ope-

raciones, consiste en analizar el sistema de interés y definir el problema. Esto implica determinar, entre otras cosas, los objetivos, las restricciones, el ambiente, el tiempo permitido para resolver el problema, etc. En Investigación de Operaciones se busca por lo general soluciones óptimas para toda la organización y no soluciones subóptimas que son preferidas por algún componente.

Después de definir el problema, se formula de nuevo de una manera conveniente para el analista; en la Investigación de Operaciones se prefieren modelos matemáticos. Leyes físicas tales como $E = mc^2$ representan ejemplos de modelos ya clásicos.

Luego de formular el problema hay que investigar un procedimiento para obtener la solución. En muchos casos el modelo tiene ciertas características que hacen posible el uso de algoritmos ya conocidos; en otros casos, es necesario desarrollar o implementar un nuevo algoritmo o método de solución. Se requiere también decidir si el costo para obtener la solución "óptima" es justificable.

La prueba, evaluación y la solución del modelo requieren el uso de datos reales. Si éstos no existen, se pueden aproximar o generar sintéticamente en ciertos casos utilizando otros modelos. En seguida se formula un plan que perturbe los valores de los parámetros en el modelo; también se altera la estructura de este último por medio de alguna estrategia si se desea medir la precisión del mismo. La alteración tiene como fin:

1) Estudiar y eventualmente entender la relación que existe entre los componentes del sistema y su efecto en la función (objetivo y el ande) cuando se libera con un modelo

2) Evaluar la flexibilidad del modelo. La flexibilidad es el grado en que este modelo puede ser modificado y mejorado.

Finalmente, se tiene la fase de implementación del modelo durante la cual se sintetizan los resultados obtenidos de las primeras cinco fases, las cuales se ocupan para obtener un resultado final práctico. Esto requiere un convencimiento sistemático que debe continuarse paralelamente con el desarrollo del estudio, desde la primera hasta la última fase. Sin embargo, en la práctica es difícil convencer con un modelo matemático o sólo con un resultado numérico del mismo. Por esto es necesario ver todo el sistema del problema, o sea, los aspectos incluidos en el modelo y, además, aquellos no incluidos en él; el modelo matemático solamente se utiliza como una técnica cuantitativa que proporciona sugerencias, entre las cuales quizá esté incluida la mejor solución o resultado del problema. Por esta razón se debe comunicar de la mejor manera posible el carácter de esta metodología a la persona que toma las decisiones.

En general, un buen investigador de operaciones debe tener dos tipo de educación:

- a) Uno que esté orientado hacia los principios sobre los cuales se basa la Investigación de Operaciones, así como a sus técnicas y,
- b) Otro orientado hacia alguna profesión específica.

Puede decirse que las disciplinas fundamentales y sólidas para el desarrollo de la Investigación de Operaciones incluyen las matemáticas básicas (álgebra lineal, etc.), teoría de probabilidad, estadística, economía, ciencias de la computación y administración de empresas. Por otra parte, algunas de las disciplinas que han contribuido con un gran número de investigadores de operaciones son las matemáticas, ingeniería, economía y administración de empresas. La importancia de que el investigador de operaciones posea una profesión tradicional radica en el hecho de que le permite aplicar y aprender el uso de la Investigación de Operaciones en un campo específico de su dominio.

1.3.1 Optimización.

Volviendo nuestra atención a los modelos, recordemos -- que la estrategia de simulación consiste en variar de alguna manera los valores E , I y P , observando su efecto en el valor S . Supongamos ahora que tenemos por objetivo determinar los valores de E , I y P que maximicen o minimicen el valor de S (problema de control). Se tendría que buscar, entre todas las combinaciones de valores E , I y P , aquella que produjera el valor máximo o mínimo de S . Tal conjunto de combinaciones de valores posibles E , I y P sería el espacio de soluciones factibles. Este espacio podría ser muy complejo y extenso, dependiendo del número de valores que E , I y P puedan

tomar. El número de posibles combinaciones de valores suele ser en ocasiones tan grandes que ni las mejores computadoras digitales actuales podrían efectuar una búsqueda exhaustiva a un costo razonable. Resulta entonces imperativo eliminar de alguna manera grupos de combinaciones que no incluyan la solución o combinación óptima. La idea de buscar un máximo o un mínimo del objetivo S en un sistema es básico para el concepto de optimización. Dicho en otra forma, una solución factible no es suficiente, porque en una optimización se necesita buscar la mejor solución con respecto a un objetivo determinado.

Es posible eliminar grupos de combinaciones factibles utilizando reglas sistemáticas o algoritmos deterministas tales como el método simplex. La regla apropiada depende del tipo de modelo, lo complejo del sistema, del objetivo, etc. En general, un modelo orientado a optimización tiende a ser más simple (con menos variables) y, consecuentemente, más irreal que el orientado a simulación, ya que la mayoría de los algoritmos de optimización actuales requieren para su aplicación cierta estructura en el modelo (linealidad, por ejemplo). No obstante, el uso de un modelo simplificado nos permitiría obtener una buena solución, aunque tal vez no la óptima. Aún así, puede discutirse que es posible llegar también a un buen resultado por medio de un modelo de simulación, y que sería mejor puesto que sería más real y detallado que el modelo anterior. Esta controversia constituye una de las áreas de investigación de mayor interés en la actualidad. La Ciencia de Sistemas contribuye cada día al desarro-

de algoritmos eficientes que se puedan aplicar a modelos cada vez más reales; por otro lado, la Ciencia de la Computación contribuye cada día con el desarrollo de computadores, con el propósito de que éstas se puedan implementar y algoritmos cada vez más complejos y reales. Las técnicas de la Investigación de Operaciones tienen como objetivo implementar la filosofía de sistemas, especialmente cuando el problema es complejo. Como ya se dijo, en algunas técnicas el objetivo es optimizar, mientras que en otras es simular.

Las técnicas de optimización para problemas estáticos, llamadas con frecuencia Programación Matemática, pueden dividirse en dos clases: técnicas exactas y técnicas de búsqueda (ver figura 1.7). Las técnicas exactas incluyen desde el tradicional cálculo diferencial hasta las técnicas de Lagrange y Kuhn-Tucker. Entre las técnicas de búsqueda, se cuentan las de búsqueda parcial y las de búsqueda completa. Las de búsqueda parcial se dividen a su vez en técnicas que optimizan sucesivamente la función objetivo y técnicas que reducen sucesivamente el espacio factible; las primeras incluyen las técnicas sistemáticas de gradiente y semisistemáticas llamadas así porque utilizan iterativamente la pendiente o derivada de la función objetivo durante la búsqueda de la solución óptima; así como otras técnicas sistemáticas tales como la programación lineal, programación dinámica, etc. Las técnicas que reducen sucesivamente el espacio factible incluyen los métodos de Fibonacci, sección de oro y otros. Por otro lado, la técnica de enumeración exhaustiva implica una búsqueda completa entre todas las soluciones permitidas median-

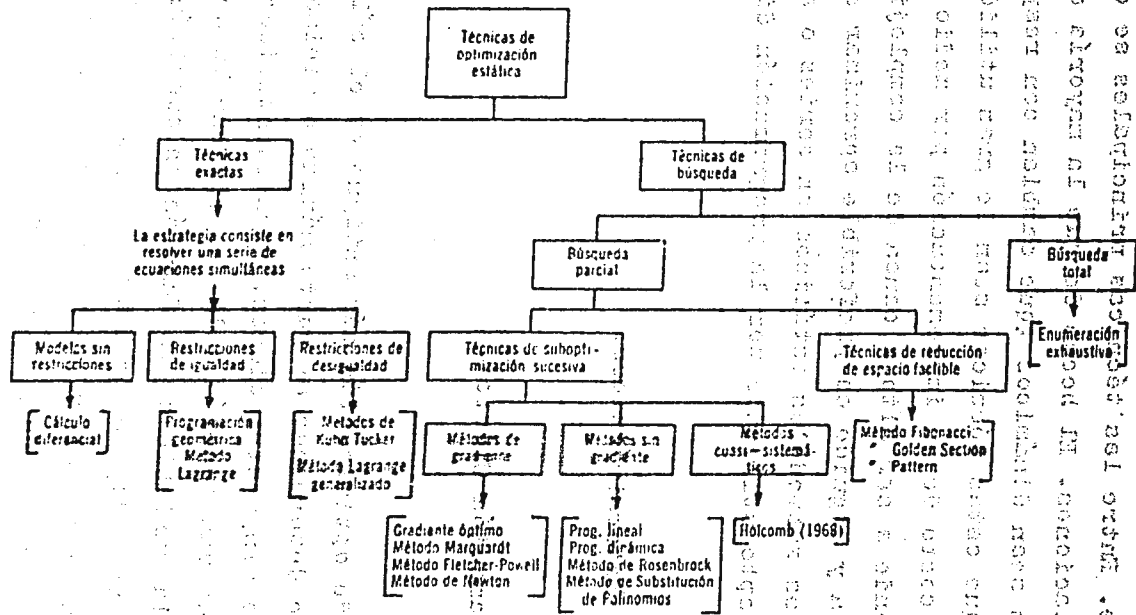


Fig. 1.7 Clasificación de técnicas de optimización.

te el empleo de una computadora.

La optimización de sistemas dinámicos es más compleja -- matemáticamente. Entre las técnicas principales se cuenta el cálculo de variaciones. El hecho de que la mayoría de los -- sistemas reales sean dinámicos (que cambian con respecto al tiempo) hacen que estas técnicas sean de gran utilidad. Por otra parte, el costo de su implementación por medio de la -- computadora tiende a ser alto a causa de la complejidad matemática requerida y seguido es preferible aproximar el modelo utilizando varios submodelos estáticos en series o etapas; -- éste es el concepto utilizado por la programación dinámica.

1.3.1.1 Modelos Determinísticos.

1.3.1.1.1 Programación Clásica.

El método de optimización más antiguo es el cálculo diferencial; puede determinar el punto máximo o mínimo de una función objetivo sin restricciones. Para identificar un máxi mo o un mínimo de una función dada, se obtiene la derivada -- con respecto a la variable de la función en cuestión (usualmente se le denota "x"), se iguala a cero, y se resuelve la ecuación para encontrar el valor de la variable. Luego se -- calcula la segunda derivada y se compara con cero para conocer si se trata de un valor máximo o de un valor mínimo.

Sin embargo, la mayoría de los problemas reales requieren minimizar o maximizar algún objetivo sujeto a ciertas restricciones. Lagrange extendió el cálculo clásico para resolver ciertos tipos de problemas que poseyeran esa estructura. Si se desea minimizar una función $\text{MIN } f(x_1, x_2)$ sujeta a una restricción $g(x_1, x_2) = b$, se define el lagrangiano $L(x_1, x_2, \lambda)$, que representa una función objetivo modificada, como la suma de la función objetivo ordinaria y la restricción, expresada como una ecuación igualada con cero, multiplicada por un multiplicador lagrangiano (λ).

$$L(x_1, x_2, \lambda) = f(x_1, x_2) + \lambda [g(x_1, x_2) - b]$$

Entonces las condiciones necesarias para un mínimo consistirían en que las derivadas parciales del lagrangiano con respecto a cada una de las variables y al multiplicador lagrangiano fueran iguales entre sí e iguales a cero.

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = \frac{\partial L}{\partial x_2} = \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$$

Para optimizar una función sujeta a varias restricciones se procede en forma análoga, aumentando las condiciones necesarias y las derivadas parciales del lagrangiano con respecto a todas las variables y a todos los multiplicadores lagrangianos.

Estos métodos son "indirectos" o "analíticos" en el sentido de que buscan el óptimo no numéricamente, sino indirectamente.

tamente mediante el cálculo de derivadas y la resolución de las ecuaciones simultáneas.

La teoría de Kuhn-Tucker es importante en la optimización indirecta, pero a causa de su complejidad requeriría de varias semanas para que se pudiera comenzar a entender sus conceptos básicos. Es por esta razón que, para los fines que nos ocupan, basta con mencionarla simplemente.

Por otra parte, se pueden usar procedimientos iterativos de análisis numérico (tales como el Newton-Raphson) para las ecuaciones simultáneas de estos métodos; y esto facilita también la aplicación numérica de esas técnicas.

1.3.1.1.2 Programación Lineal

La programación lineal resuelve el problema de asignar de una manera óptima recursos limitados a varias actividades en competencia. El adjetivo "lineal" señala que todas las relaciones matemáticas entre variables deben ser lineales. La palabra "programación" es sinónimo de planeación. Por consiguiente, programación lineal es la planeación de actividades para obtener un resultado óptimo con respecto a una función-objetivo.

El modelo matemático básico de la programación lineal es:

$$\text{MAX } [c_1X_1 + c_2X_2 + \dots + c_jX_j + \dots + c_nX_n]$$

sujeto a (restricciones de igualdad) expresadas en forma de un sistema de ecuaciones lineales:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1j}x_j + \dots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2j}x_j + \dots + a_{2n}x_n = b_2$$

$$\dots$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mj}x_j + \dots + a_{mn}x_n = b_m$$

donde $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_j \geq 0, \dots, x_n \geq 0$.

donde a_{ij}, b_i y c_j son constantes cuyo valor es conocido.

La forma "canónica" del modelo de programación lineal se escribe:

$$\text{Máx } Z = cX$$

sujeto a

$$AX \leq b$$

$$X \geq 0$$

donde la función lineal se llama "función objetivo"; las dos igualdades se llaman "restricciones" y la última de ellas se conoce como "condición de no-negatividad". "X" es un vector-

columna con "n" componentes (variables de decisión) denominada "vector de actividades". Al vector renglón "c", también con "n" componentes se le denomina "vector de precios o costos unitarios". Al vector columna "b", con "m" componentes, se le denomina "vector de disponibilidad de recursos". El vector "0" es un vector columna de "n" ceros. Por último la matriz "A", con "m" renglones y "n" columnas, se le denomina "matriz de coeficientes tecnológicos".

La gran ventaja de programación lineal es que existen "programas" generales para resolver el modelo básico, los cuales no exigen otra cosa más que el usuario conozca los valores de los parámetros a_{ij} , b_i y c_j . La desventaja principal, por supuesto, es que no todos los problemas son lineales en la función objetivo y en las restricciones.

1) Método Gráfico: Este modelo puede representarse gráficamente (ver figura 1.8). Para resolver un problema con este método, se establecen primero las ecuaciones de la función objetivo y de las restricciones. En un sistema de coordenadas rectangulares, un eje representa (a escala y en ciertas unidades) distintas cantidades de producto de una de las actividades en competencia, y el otro eje representa las cantidades atribuibles a la actividad restante. Se representan en el sistema coordinado las rectas dadas por las ecuaciones de las restricciones consideradas como igualdades y se mueve sobre el plano la línea correspondiente a la ecuación de la función objetivo paralelamente a sí misma y hacia arriba, de tal manera que se incluya, por lo menos, un punto dentro del

El espacio factible está delimitado por las restricciones y puede representarse por todos aquellos valores positivos que se encuentran en el primer cuadrante (valores positivos) y debajo de (o en) las líneas correspondientes a las restricciones.

Actividad "Y"

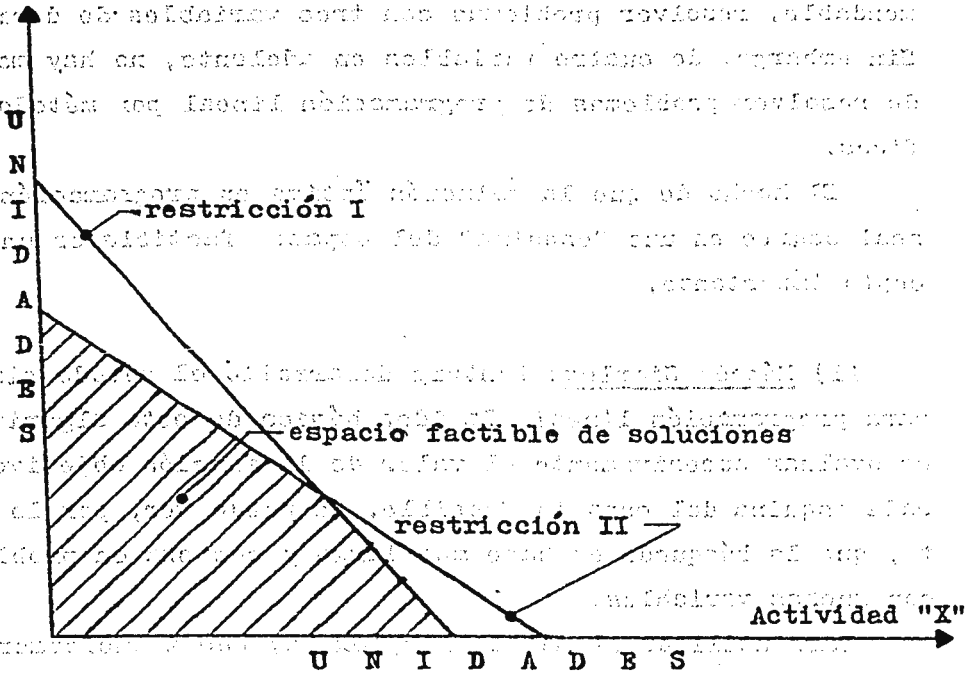


Fig. 1.8 Método gráfico de programación lineal.

espacio factible. El espacio factible está definido por las restricciones y queda representado por todos aquellos valores que se encuentran en el primer cuadrante (valores positivos) y debajo de (o en) las líneas correspondientes a las ecuaciones de las restricciones. Es posible, aunque no recomendable, resolver problemas con tres variables de decisión. Sin embargo, de cuatro variables en adelante, no hay manera de resolver problemas de programación lineal por métodos gráficos.

El hecho de que la solución óptima en programación lineal ocurre en una "esquina" del espacio factible es un concepto importante.

ii) Método Simplex: Dantzig desarrolló el método simplex para programación lineal. La idea básica de este algoritmo es evaluar sucesivamente el valor de la función objetivo en cada esquina del espacio factible. Se puede ver, por lo tanto, que la búsqueda se hace más larga y costosa en problemas con muchas variables.

Para utilizar el método simplex hay que transformar las restricciones del problema en ecuaciones; lo cual se consigue agregando variables de "holgura", es decir, a las desigualdades que representan las restricciones se les suman variables para convertirlas en igualdades. Ahora se tienen más variables en el problema, pero mantenemos el mismo número de ecuaciones originales. El número de ecuaciones es menor que el número de variables del problema sin considerar la ecuación de la función objetivo.

El método simplex permite encontrar la solución manipulando las ecuaciones para que cuando un número igual de variables a las originales sean cero, las otras adquieran valores positivos únicos.

Las reglas del método simplex son:

En caso de que exista empate entre varios candidatos,

- Paso 1. Dado cualquier programa lineal, escríbase en la forma canónica.
- Paso 2. Reescribese la función objetivo de la siguiente manera: $z - cX = 0$
- Paso 3. Conviértanse todas las desigualdades en igualdades agregando variables de holgura. La adición de estas variables crea la primera base "B", que resulta ser la matriz identidad. Esto, a su vez, genera el primer punto extremo de la región de factibilidad cuyas coordenadas están dadas por el vector "b".
- Paso 4. Constrúyase una tabla con los coeficientes del programa lineal como la que se muestra en la figura 1.9.
- Paso 5. Selecciónese como vector de entrada aquél cuya $z_j - c_j$ sea la más negativa. Si no hay ningún candidato de entrada, es decir, que todas las $z_j - c_j \geq 0$ para toda "j" en "A", la solución X_B mostrada en la tabla es óptima. En el caso de que exista un empate entre varios vectores que puedan ser candidatos, rómase el empate arbitrariamente, es decir, selecciónese a cualquiera de los candidatos.
- Paso 6. Una vez seleccionada la columna a_j que entrará a la nueva base, selecciónese el vector de salida a_r de -

Vectores que integran la base actual B

		Variables originales			Variables de holgura			Valor de la función objetivo asociado a la base actual B
Z		X_1	X_2	$\dots X_n$	X_{n+1}	X_{n+2}	$\dots X_{n+m}$	Z_0
1		$x_1 - c_1$	$x_2 - c_2$	$\dots x_n - c_n$	$x_{n+1} - c_{n+1}$	$x_{n+2} - c_{n+2}$	$\dots x_{n+m} - c_{n+m}$	
b_{1j}	0	Y_{11}	Y_{12}	Y_{1n}	$Y_{1,n+1}$	$Y_{1,n+2}$	$\dots Y_{1,n+m}$	X_{n+1}
b_{2j}	0	Y_{21}	Y_{22}	Y_{2n}	$Y_{2,n+1}$	$Y_{2,n+2}$	$\dots Y_{2,n+m}$	X_{n+2}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
b_{mj}	0	Y_{m1}	Y_{m2}	Y_{mn}	$Y_{m,n+1}$	$Y_{m,n+2}$	$\dots Y_{m,n+m}$	X_{n+m}

Identificación del punto extremo asociado a la base actual B

Fig. 1.9 Tabla de programación lineal.

En la base actual utilizando la siguiente regla se
 se o "no se debe" se obtiene el número de la columna que
 (se selecciona el no $\frac{X_{rk}}{Y_{rj}} = \text{Mín}_k \left\{ \frac{X_{Bk}}{Y_{kj}} \mid Y_{kj} > 0 \right\}$

En caso de empate entre varios candidatos,

En caso de que exista empate entre varios candidatos, hay que aplicar las llamadas "reglas lexicográficas" (no incluidas aquí, consultar la referencia 28) para romper el empate. Una decisión arbitraria puede causar que el proceso cicle continuamente sin alcanzar la solución óptima. En el caso de que todas las Y_{kj} del denominador sean negativos, se tiene el caso de una "solución no acotada".

Paso 7. La intersección en la tabla de la columna que entra y el vector que sale determina el elemento "pivote" Y_{rj} . Aplíquese operaciones matriciales elementales en el pivote Y_{rj} , con el objeto de convertir a la columna a_j en el vector unitario e_r , es decir, ceros en toda la columna y un uno en la r -ava componente, que resulta ser Y_{rj} . Regrésese al paso 5.

Eventualmente, algunos programas lineales pueden presentar soluciones óptimas múltiples o carecer de solución. Existen teoremas (referencia 28) que permiten identificar estos casos en el método simplex.

Por otra parte, el problema de minimización (Mín Z) se puede resolver simplemente transformándolo en un programa lineal de maximización (Máx $-Z$). Sin embargo, para problemas -

de minimización triyiales, o el método simplex no trabaja. En estos casos se debe ocupar el "método de penalización" o el "método de doble fase" (desarrollados en la referencia 28).

iii) Problema Dual: Asociada a cualquier estructura canónica de programación lineal se define un caso de

que se denomina el "problema primario", se define la siguiente estructura de programación lineal en forma canónica:

$$\text{Máx } Z_0 = c^T X_0$$

sujeta a

$$AX_0 \leq b$$

$$X_0 \geq 0$$

donde X_0 es un vector columna con "n" componentes, c^T es un vector fila con "n" componentes, b es un vector columna con "m" componentes, A es una matriz con "m" filas y "n" columnas.

que se denomina el "problema dual", donde "G" (escalar) es la "función objetivo dual", "Y" es un vector columna con "m" componentes denominado "vector de variables de actividades duales", "c^T" (vector columna con "n" componentes) es la

transpuesta del vector " c " y se denomina "vector de disponibilidad de recursos duales", " b^T " (vector renglón con " m " componentes) es la transpuesta del vector " b " y es llamado "vector de precios unitarios duales". El vector " 0 " es un vector columna con " m " ceros, y la matriz " A^T " (matriz de $n \times m$) es la transpuesta de la matriz " A " y recibe el nombre de "matriz de coeficientes tecnológicos".

Existen otras formas de dualidad (referencia 28) asociadas a otros tantos problemas primarios.

Las estructuras duales permiten entre otras cosas:

- a) Resolver problemas lineales que tienen más restricciones que actividades.
- b) Hacer interpretaciones económicas de las soluciones óptimas de los problemas de programación lineal.
- c) Generar nuevos algoritmos para la solución de problemas de redes de optimización (sección 1.3.1.1.5).
- d) Generar métodos como el "dual simplex" para el análisis de sensibilidad de los programas de programación lineal.

La solución de un problema lineal primario por medio del método simplex, resuelve implícitamente el problema dual. Existen teoremas (referencia 28) que permiten verificar que resolviendo ya sea el primario, se resuelve automáticamente su correspondiente dual y viceversa. La solución óptima del problema dual queda inscrita, en la tabla del método simplex, en la posición $z_j - c_j$ correspondiente a las variables X_j de holgura.

Por otro lado, una aplicación de la dualidad es la solución de problemas lineales por medio de un nuevo algoritmo llamado "método dual simplex". Así como en el método simplex se requiere que en cada iteración exista factibilidad primaria, en el método dual simplex se requiere que en cada iteración exista factibilidad dual, es decir, $z_j - c_j \geq 0$ para toda "j" en "A". Los pasos del método dual simplex son los siguientes:

Paso 1. Empezar con una tabla donde todas las $z_j - c_j \geq 0$, para toda "j" en "A".

Paso 2. Si $X_{Bi} \geq 0$ para toda $i = 1, \dots, m$, la tabla actual es óptima. Si no, se elige como vector de salida de la base, aquél cuyo correspondiente X_{Bi} sea el más negativo.

Paso 3. El vector a_k de entrada será aquél que satisfaga la siguiente regla:

$$\frac{z_k - c_k}{Y_{1k}} = \max_j \left\{ \frac{z_j - c_j}{Y_{1j}} \mid Y_{1j} < 0 \right\}; j = 1, \dots, n$$

Si todos los elementos $Y_{1j} \geq 0$, el problema original no tiene solución.

Paso 4. La columna a_k se convierte en el vector unitario e_1 con el pivote Y_{1k} igual a uno. Los cambios se llevan a cabo con operaciones matriciales elementales. Regrese al paso 2 y repítase hasta que las condiciones de optimalidad se cumplan.

Las ventajas de usar el método dual simplex en relación al método de penalización y al método de dos fases, es que no requiere del uso de variables artificiales y utiliza mucho menos iteraciones. La desventaja de este método es que se requiere para empezar a iterar, la condición de factibilidad dual.

iv) Análisis de Sensibilidad: Una vez que se halla resuelto un programa de programación lineal, puede darse el caso de que uno o varios parámetros de la formulación original, tales como los precios unitarios o la disponibilidad de ciertos recursos cambien, dando origen a un nuevo problema. En ese caso, para no volver a resolver el problema desde el principio, se usan métodos llamados "análisis de sensibilidad" que permiten ahorrar muchas iteraciones al resolver el nuevo problema partiendo de la solución óptima del problema original (referencias 20, 28, y 31).

v) Otros Métodos: Por último, la solución práctica de problemas reales que utilizan modelos de programación lineal, presentan la gran dificultad de que contienen mucha información que debe almacenarse en la computadora. Muchas computadoras no tienen capacidad de memoria que les permita almacenar toda la información requerida en la solución de problemas lineales de tales dimensiones. Bajo tales circunstancias se han desarrollado métodos que aprovechando las propiedades básicas de la estructura del método simplex, permiten la solución de problemas lineales bastante grandes, sin requerir-

del almacenamiento de toda esa información y, sin incrementar el tiempo de cómputo. Dos de esos métodos son (referencia 28): a) El "método simplex revisado", y b) El "método de descomposición lineal".

Por otra parte, existen dos clases especiales de problemas de programación lineal a los que se hace referencia frecuentemente con el nombre de "modelos de distribución" o "afijación", cuyas soluciones obtenidas por el método simplex no resultan eficientes. Por esta razón, se han desarrollado algoritmos especiales para resolverlos y se estudian por separado.

1.3.1.1.3 El Problema de Transporte.

Este problema consiste en colocar en varios destinos, las unidades situadas en varios orígenes, en tal forma que la colocación sea óptima. Matemáticamente, el problema se define de la siguiente manera:

$$\text{La función objetivo es: } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} X_{ij}$$

la cual está sujeta a las restricciones

origen	$\sum_{j=1}^n X_{ij} = a_i ; i = 1, 2, \dots, m$
destino	$\sum_{i=1}^m X_{ij} = b_j ; j = 1, 2, \dots, n$
$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j ; X_{ij} \geq 0$	para todas las "i" y "j"

donde X_{ij} es la cantidad asignada desde el origen "i" hasta el destino "j" y c_{ij} es el costo de asignar una unidad desde el origen "i" hasta el destino "j". Los valores a_i son las cantidades disponibles en cada origen, y los valores b_j son las cantidades requeridas en cada destino. Las sumas de los valores a_i y b_j deben ser iguales. Esta restricción no impone limitaciones serias al problema ya que, cuando no se cumple, todo lo que se requiere para satisfacerla es introducir un origen ficticio o un destino ficticio cuyos costos unitarios son todos ceros.

Los métodos más usuales para obtener una solución al problema de transporte son el "método de la esquina noroeste" y el "método de Vogel", presentados a continuación. La explicación se facilita si se establecen dos matrices, una de costos y otra de flujos, tal como se muestra en la figura 1.10.

- 1) Método de la esquina noroeste: El punto de partida es una matriz con orígenes, destinos, ofertas y demandas de-

		Destinos				
		1	2	...	n	Oferta
Orígenes	1	c_{11}	c_{12}	...	c_{1n}	a_1
	2	c_{21}	c_{22}	...	c_{2n}	a_2

	m	c_{m1}	c_{m2}	...	c_{mn}	a_m

Demanda b_1 b_2 ... b_n

Matriz de Costos.

		Destinos				
		1	2	...	n	Oferta
Orígenes	1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}	a_1
	2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2n}	a_2

	m	x_{m1}	x_{m2}	...	x_{mn}	a_m

Demanda b_1 b_2 ... b_n

Matriz de Flujos.

Figura 1.10

un problema balanceado (las sumas de a_i y b_j son iguales). --
 Para obtener una solución básica factible al problema, se em-
 pieza a construir una matriz de flujos de la siguiente mane-
 ra:

Paso 1. En la posición (1, 1), que es el extremo noroeste de
 la matriz, asígnese el mín $(a_1, b_1) = X_{11}$. Réstese --
 X_{11} de la oferta a_1 y de la demanda b_1 . Obviamente, --
 alguna de estas dos cantidades se convertirá en cero.

Paso 2. Si a_1 se convierte en cero, pásese a la posición ---
 (2, 1) y hágase $X_{21} = \text{mín}(b_1 - X_{11}, a_2)$. Si por el
 otro lado es b_1 el que se convierte en cero en el pa-
 so anterior, se pasa a la posición (1, 2) y -----
 $X_{12} = \text{mín}(a_1 - X_{11}, b_2)$.

Paso 3. Continúese con la misma lógica hasta llegar a la po-
 sición (m, n). La matriz de flujos que se obtenga se
 rá factible y básica.

ii) Método de Vogel: Este método basa su asignación ini-
 cial en la comparación de los coeficientes del costo.

Paso 1. Constrúyase una matriz de costos y de flujos asocia-
 dos al problema balanceado y váyase al paso 3.

Paso 2. Utilícese el remanente de la matriz de costos y flu-
 jos una vez que estos últimos se hayan asignado.

Paso 3. Se entiende por "diferencia de fila" ("de columna")-
 a la diferencia que hay entre los dos números más pe-
 queños que existen en la fila (columna). Calcúlese -

... (se toman todas las diferencias de fila y de columna de la matriz de costos; se toman los valores más pequeños de esas diferencias).

Paso 4. Seleccionese aquella fila o columna con mayor diferencia. Los empates se deciden arbitrariamente.

Paso 5. Localícese el costo más pequeño en la matriz de costos en la fila o columna seleccionada en el paso anterior. Sea esta la posición (i, j) .

Paso 6. En la matriz de flujo hágase $X_{ij} = \min(a_i, b_j)$, donde a_i es la oferta de la posición (i, j) que se identificó en el paso anterior. Hágase la oferta a_i igual a $a_i - X_{ij}$ y la demanda b_j igual a $b_j - X_{ij}$.

Paso 7. Si $a_i - X_{ij} = 0$, llénese la fila "i" de la matriz de flujos con ceros, a excepción de la posición (i, j) y elimínese esa fila de cualquier consideración futura. Por otro lado, si $b_j - X_{ij} = 0$, llénese la columna "j" de la matriz de flujos con ceros, a excepción de la posición (i, j) y elimínese esa columna de cualquier consideración futura. Regrésese al paso 2.

Para obtener el costo de la solución factible, multiplíquese cada asignación individual por su correspondiente costo unitario y sumamos.

iii) Pruebas de degeneración y optimalidad: Después de cada asignación deben hacerse pruebas de degeneración y optimalidad. Cuando el número de casillas que tienen asignaciones es menor que $m + n - 1$, donde "m" es el número de filas y "n" el número de columnas, se dice que la solución es degene

- En los siguientes pasos se resume una prueba para determinar si la solución obtenida es óptima.
- Paso 1.** Formar una matriz que contenga los costos asociados con las casillas en las cuales se han hecho asignaciones.
- Paso 2.** Utilizando esta matriz, establecer un conjunto de números u_i y otro conjunto de números v_j tales que su suma sea igual a los costos obtenidos en el paso 1. Es decir, $c_{ij} = u_i + v_j$.
- Paso 3.** Colocar el valor de $u_i + v_j$ en las casillas que no tienen asignaciones.
- Paso 4.** Restar los valores de $u_i + v_j$ de los respectivos coeficientes de costo de la matriz original. $(c_{ij} - (u_i + v_j))$. Si cualquiera de estos valores es negativo, la solución no es óptima. Si alguno de ellos es cero, cuando ninguno es negativo, existe otra solución óptima.
- Cuando la asignación no es óptima, es necesario hacer otra asignación. En los siguientes pasos se describe una aproximación sistemática para hallar una solución óptima.
- Paso 1.** Identificar la casilla de la última matriz obtenida en el paso 4 de la prueba de optimalidad que tenga el menor valor; en caso de encontrar dos valores iguales, debe hacerse una selección arbitraria.

Paso 2. Trazar una trayectoria "más-menos" en la matriz de oferta a partir de la primera asignación. Esta trayectoria debe comenzar y terminar en la casilla identificada en el paso 1. Además esta casilla es positiva. Las demás esquinas de la trayectoria se designan alternativamente como "más" y "menos". Además, en todas las esquinas deben haber asignaciones, excepto la casilla identificada en el paso 1. No es necesario que esta trayectoria sea rectangular.

Paso 3. Seleccionar en las esquinas negativas la cantidad más pequeña y hacer una asignación sumando o restando esta cantidad de las esquinas más o menos, respectivamente. Como verificación, debe tenerse la seguridad de no violar los requerimientos de ofertas y demandas. Después de cada iteración debe hacerse un ensayo de optimalidad y degeneración.

Por otra parte, la degeneración puede resolverse en cualquier etapa de la solución situando una asignación ϵ infinitesimalmente pequeña en una casilla apropiada. La asignación de ϵ se hace mediante inspección y no afecta los totales de la fila o columna ya que esta es una cantidad muy pequeña. El tratamiento de la asignación de ϵ a una casilla es el mismo que para cualquier otra asignación. Primero, se escoge el número de casillas vacantes que se requieren, de manera que este número de casillas más el número de asignaciones existente sea $m + n - 1$. Entonces, se da una asignación de ϵ a cada una de las casillas vacantes seleccionadas. Se a

plica la prueba de optimalidad y se itera; cuando se obtiene la solución óptima, ϵ se iguala a cero. Cuando se requiere más de una ϵ , debe seleccionarse arbitrariamente una de ellas como la más grande. Una regla que es suficiente, consiste en leer las filas de izquierda a derecha, empezando con la fila superior, y en considerar a la primera ϵ que se encuentre la más pequeña, a la siguiente la que le sigue en tamaño, y así sucesivamente.

1.3.1.1.4 El Problema de Asignación.

Específicamente, este modelo está relacionado con la asignación de un determinado número de orígenes al mismo número de destinos con el objeto de optimizar alguna función de efectividad. Matemáticamente, el modelo de asignación se define como la optimización de la función:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

donde c_{ij} son los coeficientes de costo, sujetos a las restricciones:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, 0 ; j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, 0 ; i = 1, 2, \dots, n$$

En este tipo de problemas la oferta en cada origen es de valor uno y la demanda en cada destino es también de valor uno.

Una condición necesaria y suficiente para que este tipo de problemas tenga una solución, es que estén balanceados. A un problema de asignación desbalanceado se le balancea del mismo modo que a un problema de transporte.

El problema de asignación se puede resolver por medio de los métodos utilizados en el problema de transporte, pero debido a que solamente se permite una asignación en cada fila y columna este es un problema degenerado de transporte. Por consiguiente se utiliza un método especial, el cual se explica a continuación.

1) Método Húngaro: Los matemáticos húngaros König y Egervary aportaron las teorías que sirven de base a este algoritmo.

Paso 1. Dada una matriz de costos de un problema de asignación balanceado, reste en cada columna y en cada renglón el número más pequeño de esa columna o renglón, del resto de los elementos en esa columna o renglón.

Paso 2. En la nueva matriz de costos selecciónese un cero en cada renglón y columna. Elimine durante el proceso de selección la columna y el renglón al que pertenece el cero seleccionado. Si al finalizar este paso -

se ha hecho una asignación completa de ceros, es decir, cada origen tiene asignado un solo destino y cada destino tiene asignado un solo origen, se ha encontrado la asignación óptima. En caso contrario continúe en el paso 3.

Paso 3. Este paso tiene seis secciones, a saber:

- 3.1 Marque cada fila que no contiene un cero asignado.
- 3.2 Marque cada columna que contiene un cero en la fila marcada en el paso 3.1.
- 3.3 Marque cada fila que contiene un cero asignado en la columna marcada en el paso 3.2.
- 3.4 Repita los pasos 3.2 y 3.3 hasta que no se puedan marcar más columnas o filas.
- 3.5 Tache las filas no marcadas y las columnas marcadas.
- 3.6 Selecciónese al número más pequeño de los elementos no cubiertos por una tachadura horizontal o vertical. Reste ese elemento del resto de los no tachados y sume ese elemento a los tachados en cruz, es decir, por una tachadura horizontal y vertical. Los elementos cruzados por una sola tachadura no cambian. Regrédese al paso 2.

Frecuentemente en algunos problemas es posible hacer más de una asignación óptima.

Por último, el desarrollo de algún ejemplo de aplica---

ción, en el capítulo 4, dará claridad a los métodos que aquí hemos presentado.

1.3.1.1.5 Redes de Optimización.

Aunque los modelos de redes son casos particulares de la programación lineal, disponen de métodos de solución propios que resultan más eficientes que el método simplex y, por esta razón, son tratados en forma independiente.

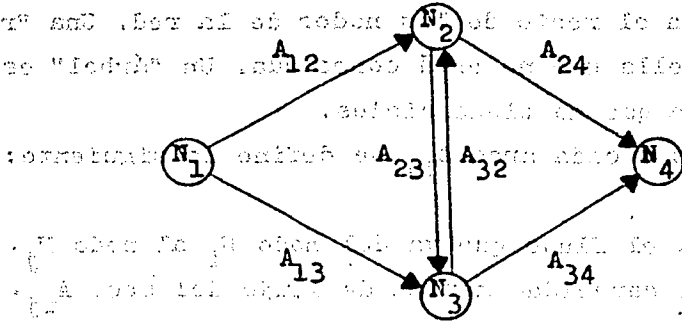
Los problemas que se resuelven con estos modelos incluyen: problemas de flujo máximo en una red, problemas de flujo por una red a costo mínimo, problemas de flujo máximo por una red a costo mínimo, problemas de flujos múltiples por una red, problemas de expansión por una red, árboles mínimos de comunicación en una red y por último redes de actividad.

Una "red" está formada por un grupo de "nodos", conectados por "arcos" y que llevan "flujos". Existen arcos "dirigidos" de un nodo a otro y existen arcos que no tienen dirección. A las redes cuyos arcos no tienen dirección se les llama "adireccionales" (ver figura 1.11).

Se denotará al nodo "i" por N_i y al arco dirigido del nodo "i" al nodo "j" por A_{ij} . Cuando se trate de un arco no dirigido entre N_i y N_j , se utilizará indistintamente la nomenclatura A_{ij} o A_{ji} .

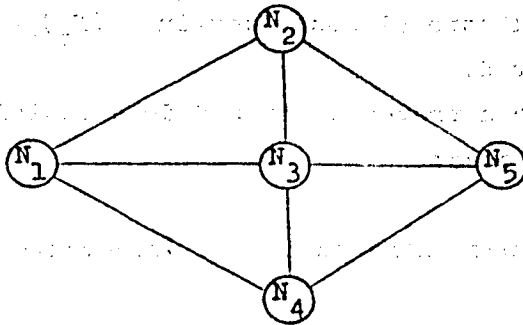
Una "cadena" de N_1 a N_k es una serie de nodos y arcos que unen los nodos N_1 y N_k . Un "ciclo" es una cadena que em-

... de "requisitos" ...
 ... "algunos" ...
 ... "de" ...



Red con arcos dirigidos

... de "requisitos" ...
 ... "algunos" ...
 ... "de" ...



Red adireccional

Figura 1.11 Redes.

pieza y termina en el mismo nodo. "Cadenas simples" son aquellas cadenas que no contienen ciclos. Una "red conexa" es aquella en donde existe por lo menos una cadena que conecta a cada nodo con el resto de los nodos de la red. Una "red inco nexa" es aquella que no está conectada. Un "árbol" es una -- red conectada que no tiene ciclos.

Asociado a cada arco A_{ij} se define lo siguiente:

$x_{ij} \geq 0$, el flujo que va del nodo N_i al nodo N_j .

$u_{ij} \geq 0$, capacidad máxima de flujo del arco A_{ij} .

$l_{ij} \geq 0$, cantidad mínima de flujo que debe fluir del no do N_i al nodo N_j .

$c_{ij} \geq 0$, costo por unidad de flujo que va del nodo N_i - al nodo N_j .

En cualquier red se van a distinguir dos nodos en espe cial. Uno es el nodo "fuente" (N_s) por donde entra el flujo- a la red y el otro el nodo "destino" (N_t) por donde sale el- flujo de la red.

El flujo a través de la red debe satisfacer las siguien tes restricciones:

- a) El flujo entra en la red únicamente por el nodo fuen te.
- b) Hay conservación del flujo en un nodo intermedio, es decir, el total del flujo que entra en cierto nodo - es igual al total del flujo que sale del mismo.
- c) El flujo sale de la red únicamente por el nodo desti

- El flujo en un arco debe conformar los requerimientos mínimos y las capacidades máximas del arco. Existen numerosos ejemplos en el mundo real que satisfacen este modelo:

- Intersecciones de Carreteras y Vehículos
- Aeropuertos y Rutas aéreas y Aviones
- Estaciones de bombeo y Pipas o tubos y Fluido
- Centros de trabajo y Rutas de movimientos y Trabajos
- Interruptores y Canales o líneas y Mensajes
- Telefonos y líneas telefónicas

Basados en varios algoritmos existen en la actualidad programas ya hechos para resolver los dos problemas fundamentales de redes: la determinación del flujo máximo cuando los arcos tienen una capacidad de transporte dada, y la identificación de la distancia mínima. La programación dinámica puede resolver ambos problemas en los casos en que todos los flujos permitidos se efectúan en una sola dirección.

Algunos de los algoritmos desarrollados hasta ahora son: el "algoritmo de etiquetas" de Ford y Fulkerson para el problema de flujo máximo en una red; algoritmos de Dijkstra, Bellman, Dantsig, Ford y Fulkerson, y Minty para problemas de flujo a costo mínimo; algoritmo de Busacker y Gowen, y al

goritmo "out of kilter" de Ford y Fulkerson para problemas de flujo máximo a costo mínimo; algoritmo de T.C. Hu para problemas paramétricos de redes y problemas de expansión; algoritmo de Kruskal para árbol mínimo de comunicación en una red; algoritmo de T.C. Hu para flujo de bienes múltiples en una red; y para redes de actividad existen la "ruta crítica", en el caso determinístico, y el modelo PERT (Program Evaluation and Review Technique), en el caso probabilístico.

Algunos de estos algoritmos serán presentados más tarde, durante la resolución de ciertos ejemplos de aplicación.

Algunas de las aplicaciones de los problemas de flujo a costo mínimo son: problemas de reemplazo, problemas de distribución (transporte, asignación y transbordo), problemas de confiabilidad, y problemas de rutas más largas y costosas (cambiando el proceso de minimización por uno de maximización).

Los problemas de flujo máximo a costo mínimo tienen una aplicación bastante amplia dentro del área de optimización de recursos.

La aplicación del árbol mínimo de comunicación en una red se ubica, sobre todo, en las redes de comunicación eléctrica, telefónica, telegráfica, carretera, ferrocarrilera, aérea, marítima, etc., donde los nodos representan, por ejemplo, puntos de consumo eléctrico, teléfonos, telégrafos, terminales de autobuses, trenes, aeropuertos, puertos marítimos, etc., y los arcos podrían ser, por ejemplo, las líneas de alta tensión eléctrica, líneas telefónicas y telegráficas, carreteras y vías de ferrocarril, rutas aéreas y marítimas, etc.

Las redes de actividad representan dos aspectos muy particulares de cualquier proyecto: una relación de precedencia entre las diferentes actividades del proyecto, y la duración y el costo de cada actividad. El método de ruta crítica permite una asignación uniforme de recursos entre todas las actividades de un proyecto.

1.3.1.1.6 Programación Dinámica.

Existen ciertos problemas de optimización que sólo pueden ser resueltos cuando se les descomponen en una serie de etapas. Por el "principio de optimalidad" de Bellman, la solución secuencial de los problemas de decisión asociados con cada etapa es equivalente a la solución del problema de decisión del sistema original. Este procedimiento secuencial se conoce como "programación dinámica".

A diferencia de otros tipos de "programaciones", no existe un modelo básico o estándar para todos los problemas de programación dinámica. Esta técnica es más bien un procedimiento para resolver problemas, donde las ecuaciones deben formularse de acuerdo con el tipo de sistema de que se trate. Por otra parte, una de las desventajas más grandes de esta técnica es su ineficiencia en la resolución de problemas con muchas variables. El tamaño de los problemas aumenta exponencialmente con el número de variables.

Las características de un problema apropiado para Pro--

gramación Dinámica son las siguientes: que

1) El problema se pueda dividir en etapas y que en cada etapa haya una decisión que hacer;

2) Cada etapa contenga varios "lugares" o "estados";

3) El resultado de una decisión, estando en cierto estado de una etapa, sea "brincar" a otro estado de la siguiente etapa,

y

4) Si se especifica el estado presente, la política de decisiones óptima para el resto de las etapas sea independiente de la política seguida en las etapas anteriores.

El algoritmo numérico empieza por buscar la política óptima para cada estado de la última etapa (en tiempo o distancia). En seguida se utiliza una relación recursiva que determina la política de decisiones óptima para cada estado de la etapa "n" (la etapa final se cuenta como 1; la penúltima como 2; la antepenúltima, 3; etc.), utilizando la política óptima para cada estado de la etapa N-1 (véase la figura 1.12):

$$f_n(X_n, d_n) = \text{OPT}_d \left[C(X_n, d_n) + f_{n-1}(X_{n-1}) \right]$$

$$X_{n-1} = H(X_n, d_n)$$

donde OPT significa optimizar (maximizar o minimizar), d_n -- (vector) representa la variable de decisión cuando existen -- "n" etapas que se deben analizar ($n = 1, \dots, N$), y donde --

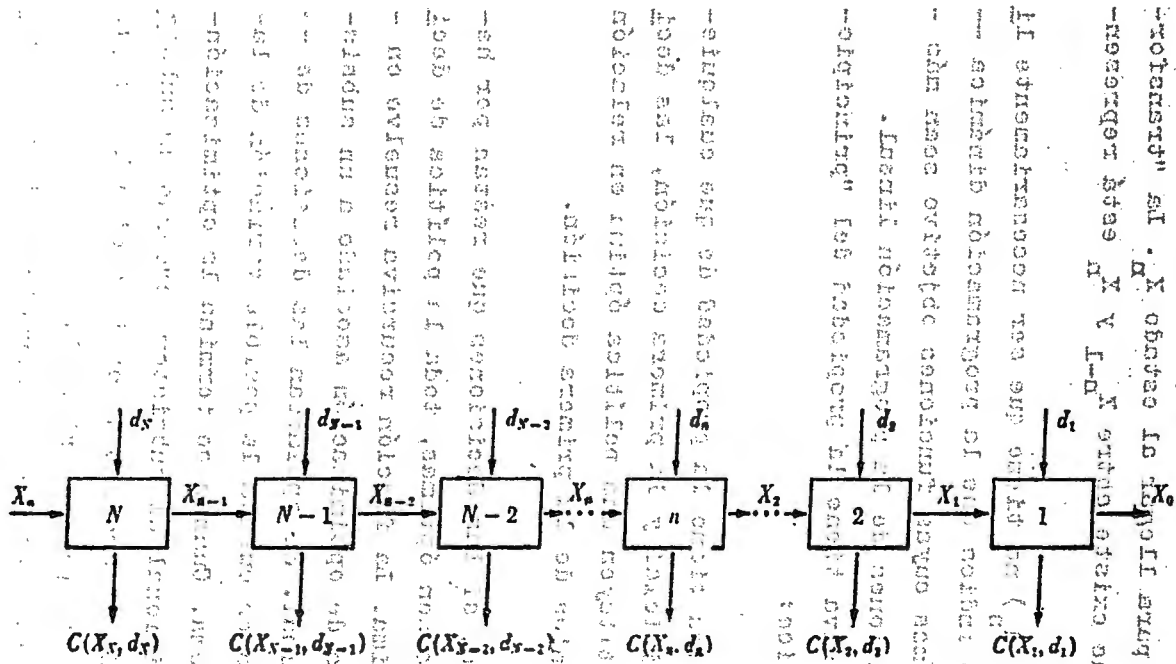


Fig. 1.12 Etapas de programación dinámica.

$f_n(X_n, d_n)$ es el valor óptimo de la función objetivo desde la primera etapa hasta la etapa "n", siguiendo una política (d_1, \dots, d_n) óptima para llegar al estado X_n . La "transformación" o relación que existe entre X_{n-1} y X_n está representada por $H(X_{n-1}, d_n)$.

La función $C(X_n, d_n)$ no tiene que ser necesariamente lineal o continua; esto indica que la programación dinámica puede resolver problemas cuyas funciones objetivo sean más complejas que las funciones de la programación lineal.

La función recursiva tiene la propiedad del "principio de optimalidad" que dice:

Una política óptima tiene la propiedad de que cualquiera que sea el estado inicial y la primera decisión, las decisiones restantes constituyen una política óptima en relación a los efectos resultantes de la primera decisión.

En pocas palabras, si las decisiones que restan por hacerse en un sistema no son óptimas, toda la política de decisiones tampoco es óptima. La función recursiva resuelve en cada etapa un problema de optimización asociado a un subsistema del sistema original. Se optimizan las decisiones de ese subsistema tomando en cuenta la posible variación de la entrada a ese subsistema. Cuando se termina la optimización se añade una etapa adicional al subsistema creando un subsistema mayor. Se continúa el proceso de optimización hasta que el subsistema abarque al sistema original.

Desde luego, existen diferentes estructuras de programa

ción dinámica (referencias 20 y 28) con un sistema de etapas
 cuando las eficiencias y/o efectividades parciales del
 sistema son positivas como utilidades, rendimiento, etc.; la
 función recursiva de las "n" etapas se maximiza. En caso de
 eficiencias y/o efectividades negativas como costo, probabi-
 lidad de falla, etc.; se minimiza.

La programación dinámica no es una técnica, como lo son
 el método simplex o el de transporte, sino que es un concep-
 to aplicable a la solución de muchos tipos de problemas de
 optimización (lineales, enteros, redes, no lineales, inventa-
 rios, etc.). Este concepto de la programación dinámica se ba-
 sa en la recursividad que se estructura de la descomposición
 de un sistema en varias etapas. Sin embargo, la programación
 dinámica (debido a los problemas de dimensionalidad) no se u-
 tiliza para resolver todo tipo de problemas. Los problemas -
 lineales deben resolverse por el simplex, los de transporte -
 por el método de transporte, los de asignación por el método
 húngaro, los de redes por algoritmos de redes, los enteros -
 por métodos propios de enteros y los "recursivos" por la pro-
 gramación dinámica.

1.3.1.1.7 Programación Entera y Heurística.

La programación entera se utiliza en la solución de pro-
 blemas cuyas variables de decisión no pueden tomar valores -
 fraccionarios. Aunque existen muchos métodos que han demos-

trado teóricamente su convergencia a una solución óptima, en la práctica, esta convergencia puede resultar tan lenta, que para fines prácticos el método resulta inservible, es decir, es muy caro en términos de tiempo requerido de uso de una computadora o en términos de costo de operación.

Parte del problema en la programación entera radica en la diferencia esencial que existe entre ésta y la programación lineal. En programación lineal se optimiza una función sobre una región de factibilidad convexa, mientras que en programación entera se optimiza una función sobre una región de factibilidad que generalmente no es convexa. Por lo tanto, la solución de problemas enteros, es de muchos órdenes de magnitud más complicada que la programación lineal.

Los tres problemas de estructura entera son: 1) Problema entero: Maximizar la función objetivo $Z = cX$ sujeta a $AX \leq b$ y $X \geq 0$, entero. 2) Problema entero-mixto: Maximizar la función objetivo $Z = cX + dY$ sujeta a $AX + BY \leq b$ y $X \geq 0$, entero, $Y \geq 0$.

$$AX \leq b$$

donde $X \geq 0$, entero.

2) Problema entero-mixto:

$$\text{Opt } Z = cX + dY$$

sujeto a $AX \leq b$ y $X \geq 0$, entero

$$X \geq 0; Y \geq 0, \text{ entero}$$

3) **Problemas entero-cero-uno o problema binario:**

$$\text{Opt } Z = cX$$

sujeto a $AX \leq b$ y $X = 0 \text{ ó } 1$

En problemas simples, se podría utilizar un método gráfico similar al de programación lineal. En este caso, no obstante, la solución óptima no estará necesariamente en las esquinas del espacio factible, lo cual hará inadecuado el uso del método simplex. No obstante si al resolver un problema entero, por medio de alguna técnica de programación lineal, el resultado óptimo del problema lineal (generado por el problema entero, al ignorar las restricciones de integridad de las variables del mismo) es entero, entonces, es también una solución óptima del problema entero original.

Algunos problemas de carácter entero relacionados con los sistemas de transporte son: el problema de determinación del tamaño de flota de vehículos, la programación de entrega de paquetería por transporte terrestre y la programación de-

horario de tripulación aéreos, ferrocarrileros, terrestres y marítimos. Los algoritmos para resolver este tipo de problemas son heurísticos y serán presentados en un par de ejemplos del capítulo 4.

Entre los métodos que se han desarrollado en programación entera tenemos: métodos de planos de corte, métodos de bifurcación y acotación y métodos de enumeración implícita.

1) Métodos de planos de corte: Los métodos de planos de corte fueron los primeros que se utilizaron para abrir la brecha de la programación entera y tienen su origen con Gomory. La desventaja de estos métodos es que resultan muy ineficientes para resolver problemas enteros de tamaño medio. Estos métodos generan en cada interacción una restricción y una variable extra. Sin embargo, su ventaja es que ilustran lo que se pretende hacer con la región de factibilidad del problema entero, para lograr la solución del mismo. La diferencia entre los métodos duales y primarios en los algoritmos que utilizan "planos de corte" consiste en que los primeros generan una solución factible del problema hasta que se llega a la solución óptima, mientras que los segundos pueden producir una solución factible desde la primera iteración, pero la convergencia de estos últimos es muy lenta.

Los principales algoritmos existentes son los algoritmos de Gomory: algoritmo fraccional, algoritmo entero puro y algoritmo entero mixto. Todos ellos parten de la solución del problema lineal correspondiente al problema entero.

ii) Métodos de bifurcación y acotación: Estos métodos son elegantes y simples, redondean y acotan variables enteras, resultantes de la solución de los problemas lineales correspondientes. Este proceso de acotamiento y redondeo se hace de una manera secuencial lógica heurística, que permite eliminar con anticipación un buen número de soluciones factibles alejadas del óptimo a medida que se itera. De tal suerte que si una variable entera está acotada entre un límite inferior entero y un límite superior entero, el proceso de bifurcación y acotación sólo analiza un número muy pequeño de todas las posibles soluciones.

Los algoritmos de bifurcación y acotación más importantes son: el algoritmo de Land-Doig y el algoritmo de Driebeek que resuelven problemas enteros y enteros-mixtos.

El llamado "problema del agente viajero", frecuentemente citado en la literatura de la Investigación de Operaciones, puede ser resuelto con estos métodos.

iii) Métodos de enumeración implícita: Los métodos de enumeración implícita son métodos heurísticos, basados en la lógica, que como los métodos de bifurcación y acotación resuelven problemas enteros, sin tener que analizar todas las posibles alternativas. Así como el método de planos de corte resuelve un problema entero mediante la modificación de la región de factibilidad del problema lineal correspondiente, y el método de bifurcación y acotación mediante la ramificación de problemas que obligan a una variable fraccionada a tomar el valor entero inmediato mayor o menor a -

la fracción, el método de enumeración implícita resuelve problemas enteros mediante la aceptación o rechazo implícito de ciertas alternativas.

Los métodos de enumeración implícita se desarrollaron para resolver problemas de tipo binario. Sin embargo, cualquier problema entero puede convertirse en un problema binario.

Los métodos principales son: el método aditivo y el algoritmo aditivo generalizado, ambos de Balas.

iv) Otros Métodos: Existen otros métodos para la solución de problemas enteros, como los métodos basados en la "teoría de grupos" y el método de descomposición de Benders que son más complejos y requieren que quien los utilice tenga conocimientos profundos de álgebra moderna.

1.3.1.1.8 Programación No-lineal.

Los modelos y métodos en la programación no-lineal optimizan funciones no-lineales, continuas y discretas, diferenciales y no diferenciables, de una y muchas variables, sin y con restricciones (lineales y no-lineales).

Estos modelos se han aplicado a una variedad de casos prácticos, tales como procesos químicos, cotización de proyectos, problemas de diseño estructural, ajuste de curvas, e

equivalencia determinística de problemas aleatorios, asigna-

ción de recursos, etc.

Sean $f(X)$ una función continua, que denota a la función objetivo, $h_1(X), h_2(X), \dots, h_m(X)$ funciones continuas que denotan restricciones de igualdad, $g_{m+1}(X), g_{m+2}(X), \dots, g_p(X)$, funciones continuas que denotan restricciones de desigualdad y $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ un vector columna en el espacio euclideo de "n" dimensiones, E^n . Se define un problema de optimización no-lineal al siguiente:

$$\text{Opt } f(X)$$

sujeto a

$$h_j(X) = 0; j = 1, \dots, m$$

$$g_k(X) \geq 0; k = m+1, \dots, p$$

$$X \in E^n$$

Cuando $f(X), h_j(X), g_k(X), j = 1, \dots, m; k = m+1, \dots, p$, son funciones lineales y X es un vector en E^n con componentes continuas, entonces el problema no-lineal se convierte en un problema de programación lineal. En el caso de que todas las funciones sean lineales y X tenga componentes discretas, que solamente tomen valores enteros, entonces el problema no-lineal se convierte en un problema de optimización de enteros.

Los problemas no-lineales pueden ser:

- a) Restringidos: cuando se tienen restricciones (lineales y-

no-lineales).

- b) **No-restringidos:** cuando no se tienen restricciones y sólo se optimiza la función objetivo no-lineal.
- c) **Continuos:** cuando todas las variables y funciones son continuas.
- d) **Discretos:** cuando alguna de las variables y/o funciones es discreta.
- e) **Diferenciables:** cuando todas las funciones del problema son doblemente diferenciables.
- f) Con restricciones de igualdad y/o desigualdad.
- g) Convexos, cuadráticos, separables.
- h) Con una sola variable independiente o con varias variables independientes.

Una de las características que hace que los problemas de optimización no-lineal sean mucho más difíciles de resolver que los problemas lineales, es que la solución óptima no se encuentra en un punto extremo de la región de factibilidad.

La gran desventaja de los métodos de optimización no-lineales, es que, generalmente encuentran un "óptimo local o relativo", mas no el "óptimo global o absoluto" como sería el caso de la programación lineal. Esto es, un problema de programación no-lineal puede contener varias soluciones óptimas locales y el problema serio que se presenta es que no existe método alguno en la optimización no-lineal, que detecte sistemáticamente a todos los mínimos o máximos locales, haciendo difícil hallar el óptimo global.

otro serio problema en la optimización no-lineal, es que se pueden generar regiones de factibilidad que no son necesariamente convexas.

Dentro de los métodos de optimización de problemas no lineales, no restringidos, se consideran:

- a) Métodos de búsqueda para funciones de una sola variable -- (Fibonacci, "sección de oro", interpolación cúbica, interpolación cuadrada, Newton-Raphson).
- b) Métodos basados en el uso de derivadas para funciones de varias variables. Métodos de gradientes (ascenso o descenso acelerado, Newton, Davidon-Fletcher-Powell, Fletcher-Reeves), métodos basados en derivadas segundas, métodos de direcciones conjugadas y métodos de variable métrica.
- c) Métodos de búsqueda para funciones de varias variables, no necesariamente diferenciables (Método de Powell).

Los métodos que resuelven problemas de optimización no-lineal, con restricciones, se encuentran mucho menos desarrollados que los métodos de optimización no-lineal, no restringidos. Esto se debe a la enorme dificultad inherente en la solución de problemas restringidos. Existen, sin embargo una clase de problemas de optimización no-lineal, restringidos, donde la existencia de óptimos locales (algunos pudiéndose encontrar en el interior o en los bordes de una región de factibilidad que en general no es convexa) desaparece completamente. Estos problemas de optimización son los llamados "programas convexos".

Asimismo, existen métodos de optimización no-lineal basados en la aproximación lineal. La lógica de estos métodos consiste en aproximar el problema no-lineal por un problema lineal, que proviene de la aproximación de las series de Taylor. Los métodos de aproximación lineal resuelven una serie de programas lineales, los cuales producen un nuevo punto. Este nuevo punto, una vez que se le ajusta y corrige, genera un nuevo programa lineal, el cual produce un nuevo punto y así se continúa la secuencia.

Entre los métodos basados en el principio de "aproximación lineal", tenemos los siguientes:

- a) El método de Griffith y Stewart.
- b) El método de Wolfe para la programación cuadrática.
- c) El método de direcciones factibles de Zoutendijk, y el método de programación separable.

Además existen "métodos penales" que resuelven problemas de optimización no-lineal, transformando un problema de optimización restringido en uno no restringido, incorporando de cierta forma las restricciones en la función objetivo. Se les llama métodos penales, porque utilizan una función con la que penalizan a la nueva función objetivo, si el punto considerado se sale fuera de la región de factibilidad. Los métodos penales utilizan técnicas de optimización no-restringidas.

Los métodos penales se dividen en dos clases:

a) Métodos penales paramétricos (métodos de punto interior, métodos de punto exterior y métodos mixtos), y

b) Métodos penales no paramétricos (métodos de centros de --
 --Huard).
 Existen también otros métodos de solución de problemas de optimización no-lineales recientemente descubiertos y que llevan el nombre de "métodos de tolerancia flexible". Estos métodos reemplazan al problema original por otro más simple de resolver, que tiene la misma solución óptima. Finalmente, existe un modelo más de optimización restringida y no restringida, que resuelve problemas que tienen un alto grado de no linealidad. Este método se llama "programación geométrica" y fue diseñado por Duffin, Peterson y Zener. La lógica de la programación geométrica está basada en la "desigualdad de Cauchy" que dice:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Media aritmética ponderada} \\ \text{de } X_1, X_2, \dots, X_n \end{array} \right) \geq \left(\begin{array}{l} \text{media geométrica ponderada} \\ \text{de } X_1, X_2, \dots, X_n \end{array} \right)$$

Sin embargo, la prueba de esta desigualdad es bastante compleja y no se incluye aquí. Los detalles de los algoritmos presentados en esta sección pueden consultarse en las referencias 1, 20 y 28.

1.3.1.2 Modelos Estocásticos.

1.3.1-2.1. Procesos Markovianos de Decisión.

La teoría de procesos estocásticos es la base fundamental de la Ingeniería de Sistemas de control y procesos dinámicos; esa teoría ha tenido gran éxito en aplicaciones tales como la aeronáutica e ingeniería eléctrica. Andrei Andreivich Markov fue un matemático ruso (1856-1922) que postuló el principio de que existen ciertos procesos estocásticos cuyo futuro depende únicamente de su presente y es independiente de su pasado; éstos reciben el nombre de "cadenas de Markov". Los procesos markovianos de decisión son métodos que utilizan cadenas de Markov para resolver problemas dinámicos que pueden ser divididos en etapas, en cada una de las cuales se tiene que hacer una decisión. Los problemas que se resuelven con estos métodos son similares a aquellos que son tratados con la programación dinámica, con la diferencia de que los primeros pertenecen a situaciones probabilísticas o estocásticas, en tanto que los segundos pertenecen a situaciones determinísticas. En otras palabras, los procesos markovianos de decisión son modelos probabilísticos de situaciones estocásticas análogos a los modelos de programación dinámica en el ámbito determinístico. Sin embargo, la optimización dinámica estocástica es un tema muy complejo que exigiría la presentación de los conceptos básicos de sistemas dinámicos de control y optimización.

No obstante, hay muchos problemas de Investigación de -

Operaciones donde pueden utilizarse ventajosamente las cadenas de Markov tanto en modelaje como en análisis. Algunos ejemplos son los problemas de inventarios, reemplazo y líneas de espera.

Formalmente, los procesos markovianos de decisión se definen así:

Sea X_t una cadena de Markov finita que se observa en el tiempo " t ", $t = 0, 1, \dots$, y que puede encontrarse en cualquiera de los estados mutuamente excluyentes $0, 1, 2, \dots, M$. Después de cada observación el decisor puede elegir un camino de acción entre " k " posibles alternativas. El número " k " es finito. Asociado al estado " i " ($i = 0, 1, 2, \dots, m$) en donde se encuentra el sistema, y la acción " q " que se elige, ($q = 1, 2, \dots, k$), existe un costo esperado conocido, C_{iq} . Se conoce la probabilidad de transferencia, p_{ij} , del estado " i " al estado " j ", ($i, j = 0, 1, \dots, m$). El conjunto $\{\Delta_t, t = 0, 1, 2, \dots\}$ indica la secuencia de decisiones escogidas e instrumentadas a lo largo de " t " períodos.

Una política, denotada por R , es una regla de decisión en cada periodo de tiempo " t ". Por lo tanto, una política no es más que la especificación de la decisión que se toma en el periodo " t ". Así, la secuencia $\{d_0(R), d_1(R), \dots, d_M(R)\}$ indica explícitamente la política, o reglas de decisión, que se deben tomar cuando el proceso se encuentre en los estados $0, 1, \dots, M$, respectivamente.

Se define como un proceso markoviano de decisión al conjunto $\{X_t, \Delta_t\}$ que indica el estado de un sistema y la deci-

si se toma en el periodo $t = 0, 1, 2, \dots$

Si se conoce C_{iq} para toda $i = 0, 1, \dots, M$ y para toda $q = 1, 2, \dots, k$, el costo esperado por unidad de tiempo, para cualquier política R , denotada $E(C)$, se calcula de:

$$E(C) = \sum_{i=0}^M C_{iq} \pi_i$$

donde π_i es la probabilidad a largo plazo de que el sistema se establezca en el estado $i = 0, 1, \dots, M$.

El problema de decisión asociado a los procesos markovianos consiste en encontrar la política R que minimiza $E(C)$.

Existen varias técnicas para resolver este problema (referencia 28):

- a) Programación lineal.
- b) Algoritmos para mejorar políticas.
- c) Métodos de aproximaciones sucesivas.

De estos modelos, los métodos de aproximaciones sucesivas son los que se basan en el uso de la programación dinámica, pero en el campo estocástico.

1.3.1.2.2 Inventarios.

Los inventarios son almacenes físicos de productos que-

se mantienen a la mano para poder satisfacer una demanda.

Los modelos y sistemas de inventarios se han desarrollado para determinar las cantidades de materias primas o productos terminados que deben conservarse para ser agotadas -- con el paso del tiempo de acuerdo a una demanda establecida. Cuando la demanda es conocida, el tipo de modelos que se utiliza es determinístico; y cuando se desconoce la demanda, se le determina probabilísticamente con modelos estocásticos.

Los problemas de inventarios son muy variados y existen distintos modelos para atender todos y cada uno de los casos que suelen presentarse. La literatura técnica reporta una -- gran variedad de ellos.

Como puede notarse, los modelos de inventarios existentes se han dedicado exclusivamente a la solución de problemas relacionados con los procesos de producción de las empresas y aun cuando estos métodos pueden extenderse a problemas de personal, no tienen una aplicación inmediata a otro tipo de sistemas como son los sistemas de transporte.

Por esta razón, la presentación sucinta que sobre este tema hemos dado resulta suficiente para los fines que nos ocupan. Probablemente la utilidad de los sistemas de inventarios en los sistemas de transporte, pueda obtenerse en aplicaciones muy particulares como sería el determinar el número de unidades (vehículos) que hay que conservar en inventario, para satisfacer la demanda por parte de los usuarios durante las temporadas vacacionales. Mayores detalles al respecto, -- pueden obtenerse en cualquiera de las referencias sobre Investigación de Operaciones que al final proporcionamos.

1.3.1.2.3 Reemplazo. La teoría del reemplazo se ocupa de situaciones en las que la eficiencia tiende a deteriorarse con el tiempo, y que puede restablecerse hasta alcanzar un nivel previo mediante algún tipo de acción correctiva. El problema consiste en determinar los tiempos en los cuales dicha acción correctiva debe llevarse a cabo, para optimizar cierta medida apropiada de efectividad.

Los problemas que se consideran adecuados para ser resueltos con técnicas de reemplazo son: reemplazo de equipo mayor que se deteriora con el tiempo, reemplazo en grupo de artículos que fallan completamente, algunos problemas de mortalidad y de ocupación de personal, y finalmente, algunos problemas de situaciones de reemplazo que no encajan en estas categorías y que generalmente requieren de la teoría de la probabilidad.

En el caso de situaciones comprendidas dentro de la primera categoría, el momento en el cual es evidente el reemplazo no se presenta de una manera precisa o definida; existe un punto de reemplazo óptimo entre las funciones de costo crecientes y decrecientes. La función de costo decreciente es la depreciación del equipo original y la función de costo creciente es la disminución de la eficiencia a causa del tiempo de servicio o del desgaste. El costo mínimo se obtiene sumando ambos términos y determinando el costo mínimo total.

En los problemas de reemplazo a causa de una falla o inminencia de falla la función de costo decreciente sigue siendo la depreciación del costo original del equipo. Aunque no se considera la variación de la eficiencia de operación con el uso, es necesario reemplazar debido a la falla. Después de la falla no se requiere una decisión ya que el reemplazo es inminente. No obstante, puede ser económicamente conveniente reemplazar con base en una programación, antes de que la falla se presente. En este caso, un reemplazo anticipado da lugar a una disminución del costo. Por consiguiente el problema se convierte en la determinación del intervalo óptimo de reemplazo, es decir, en la estimación del momento en que puede ocurrir una falla con objeto de efectuar el reemplazo. Este análisis a priori de fallas se justifica porque, de ocurrir la falla, se pueden incurrir en riesgos muy altos (piezas de una turbina de avión en vuelo, equipo contra incendios, etc.) y en costos muy elevados.

Los principios utilizados para analizar este tipo de situación han sido desarrollados en su mayoría por la profesión actuarial en relación con seres humanos, y en consecuencia, es frecuente utilizar su notación y terminología (mortalidad, por ejemplo).

El deterioro económico en la utilización de equipo, puede ser ocasionado por muchos factores considerados individualmente o combinados. Los más comunes de estos son:

- a) Costo creciente de mantenimiento,
- b) Costo creciente de operación, y

c) Obsolescencia técnica y/o económica.

Los dos primeros factores, mantenimiento y operación, se consideran generalmente en el mismo grupo, ya que este es un resultado normal del deterioro debido al tiempo y al uso. Estos son los factores más fáciles de considerar, ya que generalmente, pueden estimarse con un grado razonable de exactitud. La existencia de una obsolescencia técnica o económica está bien establecida; pero es difícil de estimar, especialmente para periodos relativamente cortos. Por esta razón, este factor se considera inicialmente como un caso aparte.

Los efectos de los costos crecientes de operación y de mantenimiento, en un método discreto de análisis, pueden evaluarse mediante tabulación u optimización clásica. Si las funciones de costo se suponen continuas, el problema se puede optimizar de acuerdo a los métodos normales del cálculo diferencial.

El análisis de la obsolescencia técnica y económica se efectúa evaluando la conveniencia económica de reemplazar el equipo por el modelo más nuevo, mediante los métodos típicos de comparación estudiados en los textos de economía para ingenieros.

1.3.1.2.4 Teoría de Líneas de Espera.

De todos los conceptos tratados con las técnicas básicas de la Investigación de Operaciones, la teoría de líneas de espera (también llamada "teoría de colas") aparece como la de mayor aplicación potencial y sin embargo es quizás la más difícil de aplicar.

Una línea de espera es un fenómeno que ocurre cuando la demanda de un servicio excede la capacidad para cubrir ese servicio.

Muchas veces es imposible predecir con exactitud cuándo llegarán las unidades a pedir el servicio y cuánto tiempo se rá necesario para proveer ese servicio. La solución óptima para este tipo de problema no es fácil. La teoría de líneas de espera se ha desarrollado, no para resolver directamente o para optimizar esta clase de problemas, sino para predecir algunas de las características de una línea de espera.

La teoría de líneas de espera tiene los siguientes objetivos:

- a) Caracterizar cuantitativa y cualitativamente a una cola.
- b) Determinar los niveles adecuados de ciertos parámetros -- del sistema que balancean el costo social de la espera -- con el costo asociado al consumo de recursos.

La cuantificación de una línea de espera se puede hacer a través de un "análisis matemático" o de un "proceso de simulación". El primer enfoque, de poder aplicarse, produce resultados óptimos. Sin embargo, requiere de suposiciones muy estrictas en cuanto a la naturaleza de las llegadas de clien

tes, el tipo de servicio, el número de servidores y la estructura del sistema. El proceso de simulación tiene una aplicación más general que el análisis matemático, ya que prácticamente se lo puede utilizar para cualquier sistema. Su desventaja es que no produce valores óptimos y es mucho más costosa.

La teoría de líneas de espera utiliza modelos matemáticos y es considerada como una técnica descriptiva (no de optimización) orientada a simulación. Una de las desventajas de esta técnica es la complejidad matemática de sus modelos en el caso de problemas de servicio que incluyen prioridades u otras características especiales.

El proceso básico utilizado por los modelos de colas se representa en la figura 1.13.

Las líneas de espera se pueden clasificar de acuerdo a:

- a) El número de clientes que pueden esperar en la cola. Estos pueden ser finitos o infinitos. En realidad sólo existen los primeros; matemáticamente se facilitan los cálculos si se supone lo segundo.
- b) La "fuente" que genera la población de clientes. Esta fuente puede tener una producción finita o infinita.
- c) A la manera como esperan los clientes (en una cola o varias, con o sin opción a cambiarse de cola).
- d) El tiempo transcurrido entre la llegada de un cliente y el inmediatamente anterior. Este intervalo de tiempo puede ser una constante o una variable aleatoria independiente, cuya distribución de probabilidad se puede o no cono-

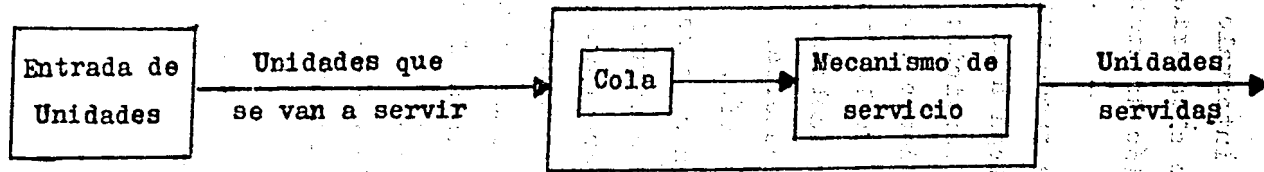


Fig. 1.13 Sistema de cola.

cer.

- e) El tiempo de servicio. Este intervalo de tiempo puede ser una constante o una variable aleatoria, dependiente o independiente, cuya distribución de probabilidad se puede o no conocer.
 - f) La disciplina de la cola. Se puede utilizar una política en la cual el primero que llega a la cola es el primero al que se le proporciona el servicio; existen políticas de prelación o prioridad en donde las características del cliente indican en qué orden se le proporciona el servicio. La disciplina puede ser también: "último que entra, primero que sale" o bien, aleatoria.
 - g) El número de servidores uno o más.
 - h) La estructura de las estaciones de servicio. Estas pueden estar en serie, en paralelo, o mixtas.
 - i) La estabilidad del sistema, que puede ser estable o transitoria. Aquí se cubre sólo la condición estable, y específicamente aquellos casos donde en un periodo determinado sólo puede ocurrir una entrada al sistema (nacimiento) y una salida del mismo (muerte).
- De ahí que matemáticamente se conozca a estos procesos estables como procesos de "nacimiento y muerte".

En la figura 1.14 se ilustran varios sistemas de cola. Para evitar enormes problemas analíticos en los modelos, siempre se debe asumir que las unidades llegan a la línea de espera siguiendo un proceso Poisson. Esta y muchas otras simplificaciones hechas con frecuencia en eg

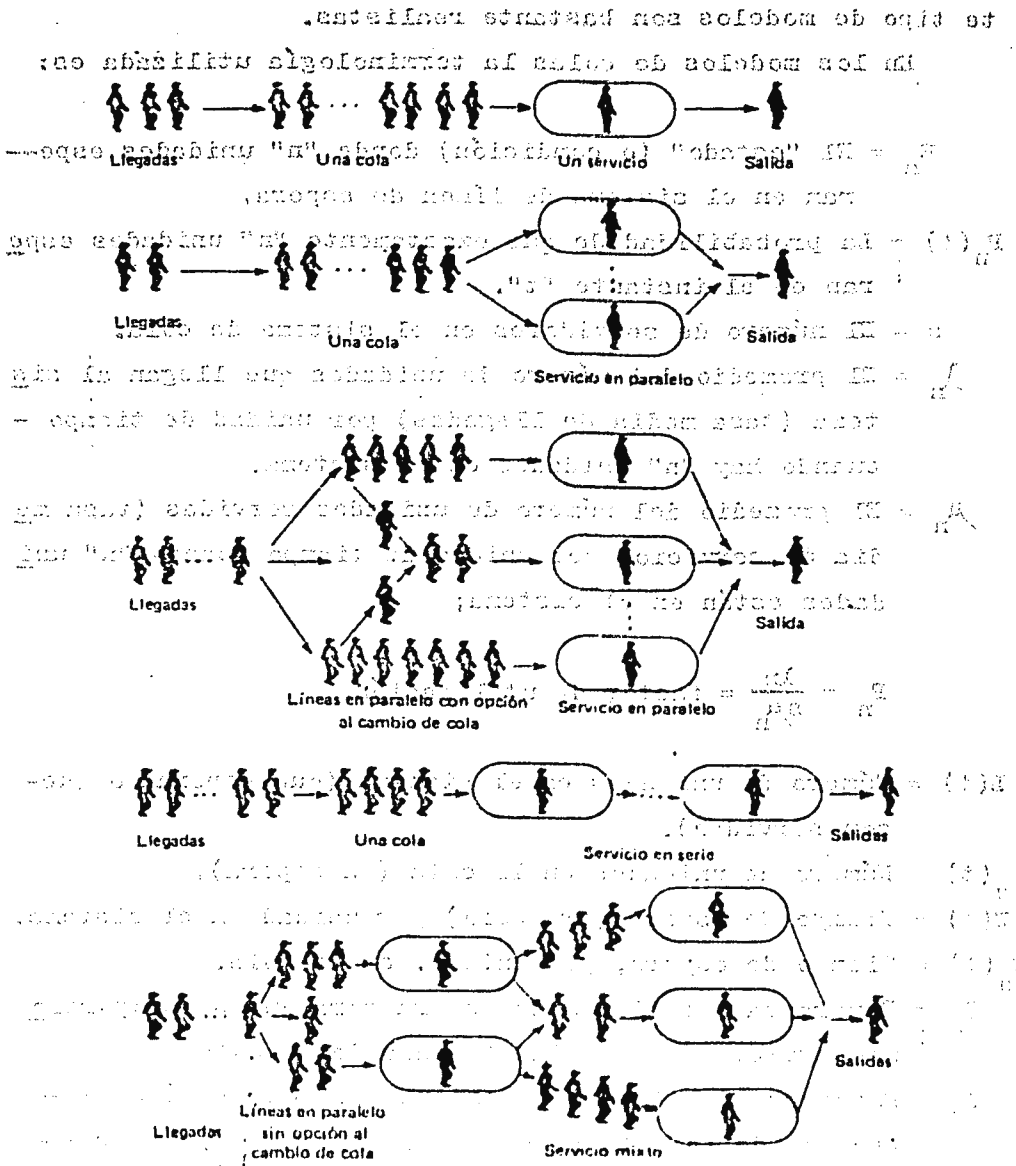
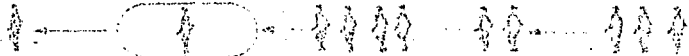


Fig. 1.14 Sistemas de colas.

te tipo de modelos son bastante realistas.

En los modelos de colas la terminología utilizada es:



E_n = El "estado" (o condición) donde "n" unidades esperan en el sistema de línea de espera.

$P_n(t)$ = La probabilidad de que exactamente "n" unidades esperaran en el instante "t".

s = El número de servidores en el sistema de cola.

λ_n = El promedio del número de unidades que llegan al sistema (tasa media de llegadas) por unidad de tiempo cuando hay "n" unidades en el sistema.

μ_n = El promedio del número de unidades servidas (tasa media de servicio) por unidad de tiempo cuando "n" unidades están en el sistema;

$$P_n = \frac{\lambda_n}{s\mu_n} = \text{factor de utilización.}$$

$L(t)$ = Número de unidades en el sistema (que esperan o que son servidas).

$L_q(t)$ = Número de unidades en la cola (en espera).

$W(t)$ = Tiempo de espera (promedio) por unidad en el sistema.

$W_q(t)$ = Tiempo de espera, por unidad, en la cola.

T_s = Esperanza del tiempo de espera para que se proporcione servicio a la última llegada de la cola.

T_w = Esperanza del tiempo de espera para que la última llegada de la cola abandone el sistema una vez que se le haya proporcionado el servicio.

-- La ley de Poisson es una ley general de las llegadas --
 por casualidad a un sistema de colas. Las tres hipótesis, re-
 queridas para que un fenómeno sea poissoniano son:

- 1) La probabilidad $P_n(t)$ no depende del instante inicial (ho-
 mogéneo con respecto a tiempo, o estacionario).
- 2) Se admite que dos unidades nunca llegan al mismo tiempo -
 al sistema de cola.
- 3) Si se toma un intervalo de tiempo muy pequeño, Δt , selec-
 cionado en cualquier instante, la probabilidad de que se
 produzca un suceso durante este intervalo es igual a $\lambda \Delta t$.
 Y por lo tanto, la ley de Poisson es:

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}$$

Por otra parte, se puede decir que un fenómeno se produ-
 ce al azar, o también, que es aleatorio cuando se le puede a-
 signar una probabilidad a la realización de todo suceso.

Se puede derivar el hecho de que si un fenómeno aleato-
 rio está distribuido según la ley de Poisson con una tasa λ ,
 entonces los intervalos entre sucesos siguen la ley exponen-
 cial con la misma tasa λ ; es decir, que la probabilidad de
 que dos llegadas a la cola estén separadas por un intervalo
 de tiempo "T" superior a un tiempo "X" dado, puede expresar-
 se de la siguiente forma:

$$P_n(T > X) = e^{-\lambda X}$$

Las ecuaciones generales del proceso de nacimiento-muerte que se basan en el concepto básico de un problema de colas es:

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = \lambda_{n-1} P_{n-1}(t) + \mu_{n+1} P_{n+1}(t) - (\lambda_n + \mu_n) P_n(t),$$

donde $P_n(t)$ es la probabilidad de encontrar n individuos en el sistema en el tiempo t .

Para $n > 0$, las ecuaciones se reducen a:

En el estado estacionario, $\frac{dP_n(t)}{dt} = 0$, por lo que:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = \mu_1 P_1(t) - \lambda_0 P_0(t), \text{ para } n=0$$

Si $P_n(t) = P_n$, entonces $\frac{dP_n(t)}{dt} = 0$ y estas ecuaciones

podrán resolverse para obtener:

$$P_n = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_n} P_0$$

donde $P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_n}}$ y $n=1, 2, \dots$

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_n}}$$

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n$$

$$L_q = \sum_{n=0}^{\infty} (n - s) P_n$$

Estas expresiones tienen soluciones analíticas en varios casos especiales muy interesantes:

Caso (1):

: (102) 211

$$\mu \dots \lambda_n = \lambda; \mu_n = \mu; \rho = \lambda/\mu; \left[\frac{\lambda}{\mu} < \frac{\mu}{\mu - \lambda} \right] = \rho < \frac{1}{1 - \rho}$$

Los principales resultados son:

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu}; P_n = P_0 (\lambda/\mu)^n; L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}; L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$$

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}; W = \frac{1}{\mu - \lambda}; \rho = \lambda/\mu$$

: (102) 211

Para el mismo caso, considerando $s > 1$, pueden obtenerse resultados semejantes. Las condiciones cambian del modo

(M) $\lambda < \mu$ y $\lambda < \mu$ en sus expresiones de este caso
Caso (2):

$$\mu \dots \lambda_n = \lambda; \mu_n = \mu; \rho = \lambda/\mu; \left[\frac{\lambda}{\mu} < \frac{\mu}{\mu - \lambda} \right] = \rho < \frac{1}{1 - \rho}$$

Se tienen las mismas condiciones que en el caso (1) y, además, la longitud de la línea no puede exceder "M" unidades.

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda & \text{si } n = 0, 1, 2, \dots, M-1 \\ 0 & \text{si } n \geq M \end{cases}$$

$$\mu_n = \mu \text{ para } n = 1, 2, \dots$$

La interpretación física de este caso sería que solamente existen espacios para "M" unidades en el sistema (un estacionamiento de automóviles, por ejemplo).

Los principales resultados analíticos para este proble-

ma son:

:(1) caso

$$P_n = \left[\frac{1 - \rho}{1 - \rho^{M+1}} \right] \rho^n \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots, M$$

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho} - \frac{(M + 1)\rho^{M+1}}{1 - \rho^{M+1}} ; L_q = L - (1 - P_0)$$

y no se requiere que $\lambda < \mu$.

Caso (3):

Sean las mismas condiciones del caso (1); además, el número total de unidades que se deben servir es finito (M).

:(2) caso

$$\lambda_n = \begin{cases} (M - n) & \text{si } n = 0, 1, \dots, M \\ 0 & \text{si } n \geq M \end{cases}$$

$$\mu_n = \mu \text{ para } n = 1, 2, \dots$$

Los resultados analíticos serían:

$$P_0 = 1 / \left\{ \sum_{n=0}^M \left[\frac{M!}{(M-n)!} (\lambda/\mu)^n \right] \right\} ; P_n = \left[\frac{M!}{(M-n)!} (\lambda/\mu)^n \right]$$

$$L_q = M - \frac{\lambda + \mu}{\lambda} (1 - P_0) ; L = M - \frac{\mu}{\lambda} (1 - P_0)$$

Tenemos las mismas condiciones del caso (1), sólo que ahora:

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu & \text{si } 0 \leq n \leq s \\ s\mu & \text{si } n > s \end{cases}$$

Si $\lambda < s\mu$, entonces los principales resultados son:

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

$$P_n = \begin{cases} \frac{(\lambda\mu)^n}{n!} (P_0) & \text{si } 0 \leq n \leq s \\ \frac{(\lambda\mu)^n}{s! s^{n-s}} (P_0) & \text{si } n > s \end{cases}$$

$$L_q = \frac{\rho_0 (\lambda\mu)^s (\rho)}{s!(1-\rho)^2}; W_q = \frac{L_q}{\lambda}; W = W_q + \frac{1}{\mu}; L = L_q + \lambda\mu$$

Hasta aquí sólo hemos considerado que el tiempo de servicio sigue una distribución exponencial; sin embargo, también es posible considerar este tiempo con una distribución tipo Erlang para la cual pueden deducirse resultados similares.

Entre el tipo de sistemas que frecuentemente se asocian a los problemas de líneas de espera podemos incluir los siguientes: un cuarto de emergencia en un hospital, la caseta de cobro de una autopista, un muelle de carga y descarga, etc.

1.3.1.2.5 Programación y Redes Estocásticas.

Esta metodología ha recibido un considerable impulso teórico y de aplicación en los últimos años. No obstante, la programación y redes estocásticas se encuentran en una etapa de caracterización, con serios problemas teóricos aún no resueltos.

La programación estocástica ha tenido algunas aplicaciones de tipo empírico en agricultura, secuenciación de aviones, industria química, teoría de control, finanzas, gerencia ejecutiva, mercadotecnia, redes, nutrición, transporte y almacenamiento.

Las redes estocásticas se han utilizado para resolver, entre otros, problemas de líneas de espera, inventarios, sistemas de producción, control de calidad y regulación de proyectos. A continuación se presentan los aspectos más importantes de la teoría de programación y redes estocásticas.

a) Programación estocástica.

La programación estocástica resuelve en teoría el problema

$$\text{Opt } f(x)$$

sujeto a

$$g_i(X) \geq 0; \quad i = 1, \dots, m$$

$$X \in E^n$$
 cuando algunos de los parámetros de las funciones $f(X)$, $g_i(X)$, $i = 1, \dots, m$, son variables aleatorias. El caso más estudiado es cuando adopta la forma lineal.

$$\text{Máx } Z = cX.$$

sujeto a

$$AX < b$$

$$X < 0$$

y las componentes de A , b , c son total o parcialmente aleatorias.

Se distinguen dos tipos básicos de programación estocástica: el "pasivo" y el "activo". En el tipo pasivo se espera a que ocurra el valor de las variables aleatorias; entonces se puede derivar soluciones exactas o aproximadas. En el segundo tipo, se toman decisiones sobre la variable X antes de que ocurran todos los eventos aleatorios; esto se puede hacer considerando un conjunto de posibles realizaciones, tomando valores esperados y penalizando la función objetivo, de manera que se eviten desviaciones no tolerables de los valores esperados.

Existen métodos de solución para este tipo de problemas, llamados de "doble etapa", que fijan el valor de algunas va-

riables de decisión antes de realizarse los eventos aleatorios. Asimismo existe un enfoque de programación lineal bajo incertidumbre, desarrollado por Dantzig, y un enfoque para resolver problemas estocásticos, llamado "programación estocástica restringida", diseñada por Charnes y Cooper, que admite cierto riesgo para violar las restricciones del problema original; el riesgo lo fija arbitrariamente el decisor.

Además, se han desarrollado algunos métodos de solución para la estructura estocástica de transporte y para programas estocásticos no-lineales.

Los detalles de los algoritmos aquí mencionados pueden obtenerse en las referencias 20 y 28.

b) Redes estocásticas.

Las redes estocásticas son conjuntos de nodos y arcos que denotan, respectivamente, operaciones lógicas y distribuciones de probabilidad asociadas a la realización de ciertos eventos aleatorios. Estas redes estocásticas se conocen en la literatura de la Investigación de Operaciones como GERT (Graphical Evaluation and Review Technique).

GERT es un procedimiento que combina las disciplinas de teoría de grafos, PERT (sección 1.3.1.1.5) y funciones generadoras de momentos.

El nodo de una red estocástica consta de un insumo lógico (entrada) y de un producto (salida). Los insumos lógicos pueden ser de tres clases: ó exclusivo, ó inclusivo e Y (exclusive-inclusive or, logical and); los productos pueden ser

dos: determinísticos y probabilísticos.

La terminología y su representación gráfica, así como la presentación detallada de esta técnica, se encuentran en las referencias 20 y 28. Por otro lado, las redes estocásticas hacen posible el análisis de sistemas bastante complejos, existiendo tres modos de estructurar tales redes: en serie, en paralelo o en circuito. Además, se ha desarrollado un lenguaje de simulación en FORTRAN, denominado GERTS III, para analizar y resolver este tipo de redes.

Finalmente, el concepto de red bajo incertidumbre desarrollado por Connors y Sangwill extiende la teoría de redes determinísticas al marco estocástico, y en esencia es similar a la programación lineal bajo incertidumbre de Dantzig; a diferencia de esta última, puede resolver problemas más complejos, debido a su estructura de red.

El principio básico de equilibrio de flujo de las redes determinísticas que establece que el flujo insumo es igual al flujo de salida en cualquier nodo, se desmorona en las redes bajo incertidumbre. En estas últimas, el flujo de salida de un nodo es una variable aleatoria con distribución de probabilidad conocida.

La estructura básica de las redes bajo incertidumbre -- considera dos nuevos tipos de nodos: de "replicación" y "recolección".

Un nodo de replicación (nodo "r") tiene una entrada sencilla y varias salidas; se le asocia la propiedad de que el flujo en cada una de las salidas debe ser igual al de la en-

trada. Y el nodo recolector (nodo "o") es el opuesto al nodo "r". La esencia del método de Connors-Sangwill consiste en estructurar un problema aleatorio por medio de nodos "r" y "o", y construir una red con un solo origen y un solo destino. A esta red se le aplica un algoritmo similar al de flujo máximo-costo mínimo, pero con ciertos ajustes.

1.3.1.2.6 Programación con Metas Múltiples: Hasta el momento se han analizado varios modelos de optimización, determinísticos y estocásticos, deductivos e inductivos, descriptivos y prescriptivos, que consideran en su función objetivo un solo propósito, una sola meta: minimizar costos, tiempos o maximizar ganancias.

La programación con metas múltiples pretende proporcionar modelos de optimización aplicables a casos donde se tienen metas múltiples, por lo general de diferente jerarquía y conflictivas entre sí.

La filosofía de las técnicas de programación con metas múltiples enfatiza que para problemas inconsistentes, es decir, con objetivos y metas múltiples no congruentes, en vez de optimizar una función objetivo, se debería minimizar la incompatibilidad, esto es, maximizar, en la medida de lo posible, el logro de los objetivos y metas múltiples del programa.

La programación con metas múltiples es una extensión de la programación lineal. Esta técnica permite resolver problemas con objetivos múltiples, incompatibles, jerárquicamente desiguales y no homogéneos en cuanto a su unidad de medida.

Se define como "programación con metas múltiples" al siguiente problema lineal:

$$\text{Mín. } \sum_{i=1}^m (d_i^- + d_i^+)$$

sujeto a

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + d_1^- + d_1^+ \cong b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + d_2^- + d_2^+ \cong b_2$$

$$\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$$

$$\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + d_m^- + d_m^+ \cong b_m$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$$

$$d_1^- \geq 0, d_2^- \geq 0, \dots, d_m^- \geq 0$$

$$d_1^+ \geq 0, d_2^+ \geq 0, \dots, d_m^+ \geq 0$$

donde d_i^+ y d_i^- , $i = 1, \dots, m$, son variables asociadas a las desviaciones de una meta. La variable d_i^- indica la desviación en defecto (hacia abajo) de una meta (lo que no se consiguió), mientras que d_i^+ es la desviación en exceso (hacia arriba, lo que se excedió). Es obvio que ambas variables de-

ben satisfacer la relación.

eficaz resolver el problema de programación lineal con objetivos múltiples. En este caso, el problema de programación lineal con objetivos múltiples se puede resolver de la siguiente manera: d_i^- y d_i^+ son los valores de desviación de los objetivos de los valores de referencia. d_i^- y d_i^+ son los valores de desviación de los objetivos de los valores de referencia.

Ya que si $d_i^- > 0$, entonces $d_i^+ = 0$ y viceversa; ambas pueden ser nulas simultáneamente.

La función objetivo puede tener cinco variantes, cada una de ellas con un significado diferente:

Caso 1. $\text{Mín} \sum_{i=1}^m (d_i^- + d_i^+)$ Caso 2. $\text{Mín} \sum_{i=1}^m d_i^-$

Caso 3. $\text{Mín} \sum_{i=1}^m d_i^+$ Casa 4. $\text{Mín} \sum_{i=1}^m (d_i^- - d_i^+)$.

Caso 5. $\text{Mín} \sum_{i=1}^m (d_i^+ - d_i^-)$.

Los modelos de programación con metas múltiples se pueden resolver con una variante del método simplex o por el método de inversa generalizada sugerido por Ijiri. Los métodos gráficos no tienen aplicación práctica y sólo son ilustrativos. Estos modelos pueden consultarse en la referencia 28.

Por otra parte, generalmente no se conoce con exactitud todos los parámetros que integran un modelo de programación con objetivos múltiples, siendo necesario utilizar técnicas de programación bajo incertidumbre de modelos lineales e introducir las a los conceptos de programación lineal con objetivos múltiples.

Madansky ha sugerido tres estrategias para incorporar la incertidumbre en modelos de programación lineal:

- a) Reemplazar valores aleatorios por sus valores esperados (método de valor esperado).
- b) Reemplazar valores aleatorios por valores pesimísticos (método pesimista).
- c) Resolver el problema como uno de dos fases, donde en la segunda se compensa por las inexactitudes de la primera (método de doble fase).

1.3.1.2.7 Problema de Localización.

Esta sección se dedica al problema de "localización y distribución de nuevas instalaciones". Por "instalación" se entiende cualquier servicio público (hospitales, estaciones de gasolina, terminales de autobuses, puertos, aeropuertos, escuelas, bibliotecas, oficinas de gobierno, etc.) o privado (bodegas, comercios, etc.). Por "distribución" se comprende la manera de asignar espacio físico a los diversos componentes de una instalación. Las coordenadas de un plano bidimensional nos auxilian en la "localización" de dichas instalaciones.

Existen modelos de localización de una o varias instalaciones en el espacio continuo y discreto; en el primer caso se localizan en un plano bidimensional las " n " ($n > 0$) insta

laciones que se desean establecer, y en el segundo, se asignan "k" instalaciones en "n" sitios preestablecidos ($k \leq n$).

Al caso en que el flujo de bienes y servicios entre instalaciones nuevas y existentes es una constante dada o una variable de decisión adicional, se lo conoce como "problemas de localización y asignación". Los problemas de localización en el espacio discreto donde el número mínimo de instalaciones requeridas para servir a una población dada es una variable de decisión, son conocidos como "problemas de cobertura". Para localizar nuevas instalaciones, en todos los modelos de optimización se considera una función objetivo de costo, la cual se minimiza. Dicha función es representativa de la distancia y/o el tiempo necesario para hacer fluir bienes o servicios de las nuevas instalaciones a las ya existentes y/o a los clientes. Sin embargo, este criterio ha sido atacado severamente y, por lo tanto, se exploran otros criterios denominados "minimax", que diseñan una función objetivo que minimiza el máximo costo de transporte resultante de una localización y/o de una asignación.

Usualmente, se analizan dos clases de normas para medir distancias. La llamada norma "rectilínea" o "Manhattan", considera que la distancia entre dos puntos no es la recta que los une, sino el mínimo número de calles que se deben recorrer; se utiliza en problemas de localización en grandes zonas urbanas, cuyas calles tienen trazos rectos y perpendiculares (como es el caso de Nueva York). El otro tipo de norma, llamada "euclídeana", considera que la distancia más corta entre dos puntos es la recta que los une; se utiliza en pro-

problemas de localización de zonas rurales y urbanas de trazo irregular (como es el caso de la mayoría de las ciudades en México).

Los problemas de localización se pueden dividir para su estudio en relación a:

1. Lo que se quiere localizar: en problemas de distribución de espacio y problemas de localización.
2. Las características de las nuevas instalaciones: en problemas de localización sencilla o múltiple, localización de punto o de área, donde el número de las nuevas instalaciones esta dado o es una variable adicional de decisión y donde la localización es independiente o dependiente de las otras localizaciones.
3. Las características de las instalaciones existentes: en problemas de localización estática o dinámica, determinística o probabilística.
4. La interacción de las diversas instalaciones: en problemas cualitativos o cuantitativos.
5. El espacio: en problemas unidimensionales o multidimensionales, discretos o continuos, restringidos o no restringidos.
6. La función objetivo: en problemas cuantitativos o cualitativos y, dentro de los primeros, problemas donde se minimizan funciones de costo y tiempo o se minimiza funciones de tipo minimax.

Los modelos cuantitativos analíticos que resuelven es--

tos problemas son de tipo normativo, es decir, prescriben un curso de acción que optimiza una función objetivo dada. Estos modelos tienen varias limitaciones. La primera de ellas es la definición de la función objetivo, que generalmente localiza el sitio o sitios, minimizando una función de costo.

Debido a que existen muchos modelos cuyos desarrollos son muy extensos, omitimos la presentación de éstos en esta sección. La literatura de la Investigación de Operaciones (referencia 28) proporciona algunos de los algoritmos utilizados en la solución de problemas de localización.

1.3.1.2.8 Problemas de Secuenciación.

En secuenciación tratamos con una situación en donde la medida de efectividad es una función del orden o secuencia en la que una serie de trabajos se llevan a cabo. Los problemas caen en dos grandes grupos. En el primero, tenemos "n" tareas que realizar, cada una de las cuales requieren de un proceso en algunas o en todas las "m" máquinas diferentes de que se dispone. La efectividad para cualquier secuencia dada de los trabajos en cada máquina puede medirse, y queremos seleccionar de las $(n!)^m$ secuencias teóricamente posibles:

- a) Aquellas que son "factibles tecnológicamente", es decir, aquellas que satisfacen las restricciones (si hay algunas) con respecto al orden en que cada trabajo debe realizarse

a través de las "m" máquinas.

.08 y 09 unidades

- b) Una (o varias) de las secuencias factibles tecnológicamente que optimiza la medida de efectividad.

... ..

En teoría siempre es posible encontrar una solución mediante enumeración, pero en la práctica, el cómputo de la efectividad para una secuencia dada puede ser bastante complejo, y el número de casos que deben enumerarse hace que este método sea prohibitivo aún para valores moderados de "m" y "n".

En el segundo tipo de problema, tenemos un taller con cierto número de máquinas y una lista de trabajos a realizar. Cada vez que una máquina completa el trabajo que estaba haciendo tenemos que decidir cual es la siguiente tarea que debe iniciarse. Una de las características de la situación es que la lista de trabajos cambia conforme se reciben nuevos órdenes. Desgraciadamente ambos tipos de problemas parecen ser intrínsecamente difíciles y actualmente se conocen soluciones únicamente para casos especiales del primer tipo. No parece, hasta ahora, haber una teoría matemática para el segundo tipo de problema, pero algunas reglas empíricas se han probado con éxito moderado mediante simulación en computadoras.

Sin embargo, debido a que la orientación de estos problemas se ha dado exclusivamente hacia líneas de producción, no tienen aplicación práctica para los propósitos de este trabajo y, en consecuencia, no profundizamos en detalles. Mayor información al respecto puede buscarse en las referen-

cias 28 y 30.

Esta técnica, aunque teóricamente se le ha utilizado para fundamentar conceptos, ha tenido poca utilidad práctica. Como la teoría de juegos ha mostrado efectividad en conflictos bélicos (pero no en épocas de paz), han sido pocos los marcos de referencia donde se conoce su uso práctico. La teoría de juegos sirvió para desarrollar la teoría estadística de decisión y la programación lineal. El desarrollo posterior de la teoría dio origen a otros conceptos matemáticos de competitividad, explícitamente los metajuegos y los debates. Dos o más individuos se encuentran en una situación de "competitividad" si el logro de los objetivos de uno de ellos implica la reducción de las probabilidades de los demás para alcanzar los suyos. Existe una teoría matemática que describe el comportamiento de los participantes; sin embargo, la serie de suposiciones que requiere le dan escasas aplicaciones prácticas.

1.3.1.2.9 Teoría de Juegos.

La competitividad puede verse desde tres puntos diferentes:

- Polca: la situación de competitividad donde el objetivo es eliminar al oponente.

- c) **Juegos:** la situación de competitividad donde el objetivo es ser más astuto que el oponente, pero sin eliminarlo.
- c) **Debates:** la situación de competitividad donde el objetivo es convencer al oponente.

La razón de incluir en los textos de Investigación de Operaciones la teoría de juegos, aún aceptando su poca utilidad práctica, es que sirvió para desarrollar las técnicas mencionadas anteriormente. Por lo mismo, para nosotros basta el mencionarla simplemente. La referencia 28 reporta algunos modelos relacionados con la teoría de juegos.

1.3.1.3 Técnicas para resolver sistemas de gran escala.

Una de las principales limitaciones de los algoritmos y técnicas en general presentados en este resumen cuando se utilizan para resolver problemas complejos de gran escala, es la alta dimensionalidad de los modelos requeridos; es decir, que el número de subsistemas, variables, parámetros, etc., es muy grande.

Existen dos filosofías creadas para simplificar el análisis de un sistema complejo que posea elementos estrechamente interconectados: agregación y descomposición.

La idea de agregación no es sinónimo de la idea de unir y coordinar elementos interconectados o subsistemas dentro de un sistema complejo. Lo que más bien se desea con esta --

técnica es combinar o agregar ciertas variables y subcomponentes del modelo detallado del sistema; la agregación se realiza de manera que se pueda usar alguna técnica sistemática ya disponible.

El otro punto de vista consiste en descomponer el sistema complejo en subproblemas, los cuales se optimizarían individualmente de acuerdo con algún procedimiento iterativo que obtuviera eventualmente la solución óptima de todo el sistema.

La selección de uno de estos métodos para resolver un problema complejo depende fundamentalmente del tipo de problema que se desea analizar y de las restricciones que se consideren. Sin embargo, no existen normas para decidir cuál de las dos técnicas utilizar ya que inclusive se puede hacer uso de ambas en un mismo problema; la agregación para las variables y la descomposición para los subsistemas.

Los detalles sobre estas técnicas se localizan en la referencia 9.

1.3.2 Simulación.

El objetivo de simulación, a diferencia del objetivo de optimización, consiste en ayudar al analista para que entienda las relaciones (causas y efectos) entre las variables del sistema así como la relativa importancia de los distintos componentes.

Hay diversas clases de simulación; por ejemplo, los modelos a escala de aviones que se ensayan en un túnel de viento, el circuito eléctrico empleado para describir un circuito hidráulico, y la descripción de un sistema mediante un modelo matemático. En esta última clase de simulación se manipula el modelo matemático de algún sistema real y se observan los resultados; entonces, estas manipulaciones y observaciones se utilizan para hacer deducciones con respecto al sistema real.

Cuando la optimización se puede utilizar para cumplir el objetivo de la simulación y, además, para obtener la solución óptima del problema, jamás se deberá utilizar la simulación.

En cierto modo, la técnica de simulación en la Investigación de Operaciones es la técnica de hacer experimentos estadísticos en un modelo matemático del sistema real. Esto es a diferencia de la optimización, la cual no busca experimentos estadísticos, sino algoritmos sistemáticos que lleven a una solución.

La computadora digital se emplea en simulación simplemente porque los experimentos estadísticos normalmente requieren que se lleve a cabo una gran cantidad de cálculos y computaciones. Por lo tanto, el programa de computadora para implementar la simulación es de gran importancia. Dicho programa debe ser lo suficientemente flexible para incluir todas las alternativas factibles y admitir las modificaciones que se hagan necesarias a medida que se entiendan mejor las relaciones entre variables y componentes del sistema. El

avance tecnológico más importante de esta área ha sido quizá el desarrollo de lenguajes especiales para simulación que describen más explícitamente los elementos que normalmente aparecen en modelos de simulación (ecuaciones diferenciales, integrales de funciones complejas, condiciones iniciales, etc.).

En general, la técnica de simulación es de gran valor en la solución de problemas que no pueden ser analizados por medio de los otros métodos de la Investigación de Operaciones. Algunas aplicaciones reales de simulación al problema de transportes son:

- 1) Simulación de las operaciones de una compañía en un aeropuerto para estudiar los efectos de ciertos cambios de política de la compañía (capacidad de mantenimiento, aviones de reserva, espacio para ascenso y descenso de pasajeros, etc.).
- 2) Simulación del flujo de tránsito que pasa por una intersección y que es regulado por un semáforo para estudiar los efectos (en la eficiencia de la intersección) producidos por el cambio de la sincronización del semáforo.

Aunque la simulación de un sistema tiene muchas ventajas, nunca se deberá subestimar el esfuerzo requerido para desarrollar el modelo, para programarlo y utilizar los resultados. Uno de los principales problemas consiste en desarrollar el modelo. No es suficiente ser un experto en lenguajes de computadora, aunque frecuentemente es casi requisito; es necesario que se conozca bien el sistema físico y que se es-

coja entre los diferentes tipos de modelos apropiados; todo depende del objetivo. Por otra parte, simplemente porque el modelo se implementó en la computadora, no quiere decir que el modelo sea válido. Existe un gran número de técnicas para el análisis y evaluación de datos; entre otros el método de Monte Carlo que consiste en una simulación sobre una muestra artificial. En estas técnicas los datos se manipulan para minimizar el volumen de datos requeridos y para maximizar la información que se puede obtener de la manipulación de estos datos.

Por otro lado, el modelo de simulación debe ser construido para que los parámetros, variables y estructura correspondan al sistema real. Los parámetros deberán incluir las características necesarias para definir el comportamiento del sistema, mientras que las variables describirán el comportamiento de los parámetros para cierto valor.

Los modelos de simulación solamente son un medio para probar nuevas ideas y no objetivo final de una simulación. Se debe seleccionar cuidadosamente el número y tipo de características del sistema real que se van a incluir en el modelo. Frecuentemente las simulaciones con modelos simples son más efectivas.

La simulación puede hacer uso desde modelos exactos o réplicas del sistema real, hasta modelos matemáticos abstractos. La gran variedad de aplicaciones de la simulación es increíble.

3.2 Métodos de Monte Carlo.

Cuando el sistema en cuestión es demasiado complicado para describirlo o cuando el modelo, una vez deducido, no permite una solución analítica; la simulación puede ser instrumento valioso para obtener la respuesta de un problema particular. Si el modelo involucra muestreo aleatorio a partir de una distribución de probabilidad el procedimiento se denomina simulación Monte Carlo.

La simulación Monte Carlo está orientada hacia la computadora, ya que sin la rapidez de ésta la mayoría de los modelos de simulación Monte Carlo, no serían prácticos. Típicamente, el muestreo simulado implica el remplazo del universo real de elementos por el universo teórico correspondiente; descrito por una cierta distribución de probabilidad que se supone adecuada, y la selección de una muestra de esta población teórica, mediante números aleatorios. Los métodos para tomar esa muestra, así como la discusión de los problemas de decisión que dependen fundamentalmente de dichos métodos de muestreo, se recogen bajo el título genérico de Métodos de Monte Carlo.

Para tomar un elemento al azar de un universo descrito por la densidad de probabilidad $f(x)$, se procede como sigue:

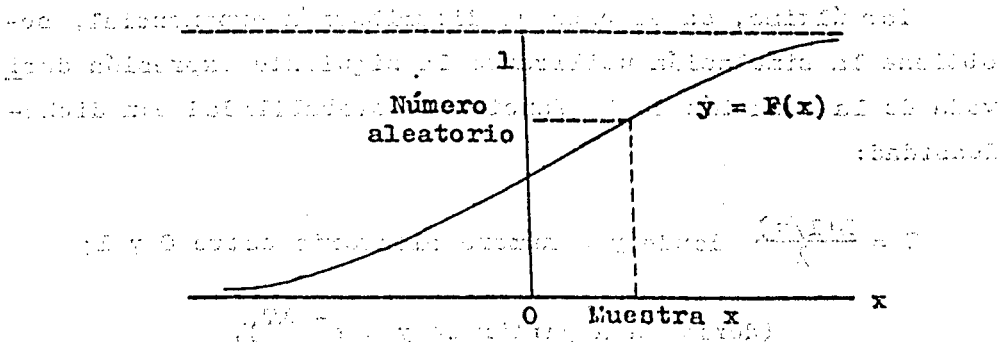
- a) Se grafica la función acumulativa de probabilidad

- y la función de densidad de probabilidad $f(x)$ es:

$$y = f(x) = \int_{-\infty}^x f(u) du$$

b) Se escoge al azar un número entre 0 y 1 (con tantas decimales como se desee) mediante dígitos aleatorios.

c) Se proyecta horizontalmente el punto sobre el eje de ordenadas que corresponde a este número aleatorio entre 0 y 1, hasta que se intersecta la curva $y = F(x)$.



d) Se anota el valor de "x" (abscisa) que corresponde al punto de intersección. Este valor de "x" se toma como el valor muestreado de "x".

En la simulación Monte Carlo es posible utilizar distribuciones empíricas discretas y distribuciones teóricas de -- probabilidad, siempre y cuando la distribución seleccionada describa adecuadamente a la variable aleatoria. Entre las -- distribuciones teóricas que pueden presentarse en un proble-

ma tenemos: distribución de Poisson, distribución normal y - distribución exponencial.

En la distribución de Poisson basta considerar el valor de "x", obtenido con Métodos de Monte Carlo, en la expresión de la función de probabilidad para realizar la simulación.

Para la distribución normal, usamos tablas de dicha densidad, que se obtuvieron de una población con media cero y desviación estándar uno. El valor correspondiente de la muestra se obtiene multiplicando el valor leído en tablas por σ , y sumando μ .

Por último, en el caso de distribución exponencial, se obtiene la simulación utilizando la siguiente expresión derivada de la ecuación de la función de probabilidad con dicha densidad:

$$T = \frac{L(1/y)}{\lambda} \quad \text{donde } y = \text{número aleatorio entre 0 y 1;}$$

(derivada a partir de $y = e^{-\lambda T}$).

1.3.2.2 Números aleatorios.

La simulación Monte Carlo requiere números aleatorios para obtener observaciones aleatorias a partir de una distribución de probabilidad. Un número aleatorio es un número de una secuencia de números cuya probabilidad de ocurrencia es igual a la de cualquier otro número de la secuencia. Los nú-

meros aleatorios se pueden obtener manualmente, mediante tablas, o mediante métodos de computadora. Los métodos manuales son laboriosos y no muy prácticos, excepto como medio ilustrativo, en el salón de clases. Estos métodos generalmente requieren recursos tales como ruletas, cartas de baraja, fichas en una urna, lanzamiento de monedas y lanzamiento de dados (de ahí el nombre de Monte Carlo).

Las tablas de números aleatorios se proporcionan en la literatura sobre este tema. Estos números aleatorios fueron generados mediante un proceso físico aleatorio (corriente eléctrica, por ejemplo) y se consideran números "verdaderamente" aleatorios. El problema con la utilización de tablas de números aleatorios es tenerlos disponibles en un programa de computadora, para lo cual habría que registrar los números aleatorios en discos o cintas magnéticas.

Quizá el proceso más común para la obtención de números aleatorios consiste en generar números pseudo-aleatorios, usualmente por medio de un programa de computadora. Una secuencia pseudo-aleatoria no es realmente aleatoria ya que se obtiene utilizando un proceso matemático completamente determinístico. Sin embargo, los números generados de esta manera se consideran como aleatorios ya que satisfacen varias pruebas estadísticas de aleatoriedad. Una secuencia de números pseudo-aleatorios puede ser eventualmente cíclica; empero, el hecho de que sea cíclica no presenta dificultades si el ciclo es bastante amplio. Dos métodos de generar números pseudo-aleatorios son las técnicas de elevar al cuadrado el número intermedio y las técnicas congruenciales.

La técnica de elevar al cuadrado el número intermedio comienza con un número que consta de un número par de dígitos, se toma el cuadrado del número, y se seleccionan los "n" dígitos intermedios de este resultado como número aleatorio. El valor de "n" es el número de dígitos del número original. El siguiente número aleatorio se obtiene por repetición de este proceso usando el número aleatorio como punto de partida.

Las técnicas congruenciales hacen uso de una fórmula recursiva. Por ejemplo, el método congruencial multiplicativo utiliza la fórmula: $x_{n+1} = kx_n$ módulo m donde x_n es el número aleatorio en el instante n , x_{n+1} es el número aleatorio en el instante $n+1$, k es un entero positivo menor que m , y m es un entero positivo mayor que k . La expresión anterior implica que el número aleatorio x_{n+1} se genera a partir del número aleatorio x_n y que estos números aleatorios son los residuos de la división de kx_n por m . Los valores de k , m y x_0 deben seleccionarse cuidadosamente. Para una computadora binaria, se indica $m = 2^b$ ($b =$ longitud de la palabra en la computadora), cualquier número impar se selecciona como x_0 , y k se obtiene según la ecuación $8t + 3$ (t es un entero).

1.3.2.3 Estimación del tamaño de la muestra.

La determinación del tamaño de la muestra antes de efectuar una simulación particular, es una decisión importante.

Sin embargo, esto es difícil ya que la mayor parte de la información requerida para especificar el tamaño de la muestra correctamente, no se conoce hasta después de hacer la simulación. Por este motivo, se requieren algunas suposiciones y relaciones que puedan considerarse como estimativos razonables.

En la mayoría de las simulaciones generalmente hay dos parámetros de particular interés, estos son la media y la desviación estándar. Con estos parámetros y con las técnicas de muestreo impartidas en los cursos de probabilidad y estadística para ingenieros, es posible obtener un tamaño de la muestra adecuado para la simulación.

Hay, por supuesto, otros enfoques para determinar el tamaño de una muestra. Uno consiste simplemente en seleccionar un valor grande para el tamaño de la muestra; entonces, utilizando los resultados de la simulación se establecen los niveles de confiabilidad. Otro enfoque consiste en calcular el valor promedio después de cada prueba hasta que éste se aproxime a un límite. Cuando la diferencia entre los valores más altos y más bajos es igual o menor que alguna cantidad establecida, se termina la simulación. Este procedimiento también se puede utilizar para calcular la varianza y la desviación típica.

Hay aún otro método, más costoso que los anteriores, que consiste en efectuar varios ensayos piloto para tener una idea de la media de la población y su desviación estándar.

dar. Estos valores de la media y de la desviación estándar -- inicialmente estimados, se pueden utilizar como aproximación del tamaño de la muestra.

Los métodos discutidos aquí para determinar el tamaño de la muestra son aproximados. En un análisis completo como el que se requiere en la mayoría de los casos, se debe hacer un balance entre la práctica y la teoría.

1.3.2.4. Lenguajes de simulación.

Por último, teniendo en cuenta que los estudios de simulación están enfocados hacia la computadora, puede deducirse que la programación de todos los detalles requeridos en un estudio de simulación puede ser bastante complicada. Esto se

ría cierto si se utilizara un lenguaje de programación de propósito general tal como el FORTRAN. Afortunadamente, están fácilmente disponibles los lenguajes de simulación general tales como GPSS, SIMSCRIPT, SIMPAC, DYNAMO y GASP.

1.3.3 Análisis de Decisiones.

"Decidir" es un proceso por el que una o más personas -- seleccionan una alternativa de entre un conjunto para, de acuerdo a ciertos criterios, alcanzar una serie de objetivos

y metas prestablecidas; todo lo anterior, dentro del entorno de los posibles estados que pueda guardar la naturaleza.

El proceso de decisión puede realizarse en un entorno - determinístico; estocástico (bajo riesgo) o conflictivo, o - bajo total incertidumbre. Para el primer caso, se utilizan los modelos determinísticos; para el segundo, los modelos estocásticos; y para el tercero, la "estadística clásica" o la "teoría estadística de decisión" (específicamente, los "procesos bayesianos de decisión").

En cualquier acto de decisión se distinguen los siguientes elementos:

- a) Uno o más "decisiones" que tienen una serie de "objetivos" y "metas" (objetivos cuantificados en el tiempo y en el espacio) supuestamente bien definidos.
- b) Un conjunto de posibles "acciones" o "alternativas" disponibles a los decisores.
- c) Un conjunto de posibles "resultados" generados por la instrumentación de acciones.
- d) Un "entorno" dado por los posibles estados que guarda la naturaleza en relación a los objetivos de los decisores, sobre los cuales éstos no ejercen ningún control.
- e) Una "función" que liga acciones y resultados con el entorno.
- f) Un "proceso de decisión", que selecciona una o varias acciones, dado un cierto entorno y metas explícitas del grupo de decisores.
- g) Un "criterio" que enmarca el proceso de decisión.

En el caso de total incertidumbre, los criterios que pueden enmarcar el proceso de decisión son:

- a) Maximizar la mínima pérdida (criterio pesimista).
- b) Maximizar la máxima ganancia (criterio optimista).
- c) Coeficientes optimistas-pesimistas (criterio intermedio).
- d) Minimizar el arrepentimiento máximo (lo que pudiera ocurrir a posteriori como consecuencia de acciones instrumentadas a priori).
- e) Igualdad en la verosimilitud asociada a la ocurrencia de cualquiera de los estados de la naturaleza (se escoge la acción cuya suma simple aritmética de beneficios es la mayor).
- f) Estrategias mixtas (teoría de juegos).

Formalmente, un problema de decisión establece la existencia de un conjunto de posibles acciones $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$

Al elegir el grupo decisor una acción cualquiera $a_j \in A$, se conocen o estiman las posibles consecuencias, que son a su vez función de los estados de la naturaleza. El conjunto θ representa los posibles estados de la naturaleza $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ y éstos, a su vez, son sólo la representación de la situación real donde incide la acción $a_j \in A$. El decisor no ejerce ningún control sobre la ocurrencia de los posibles estados de la naturaleza. Las consecuencias de instrumentar una acción cualquiera $a_j \in A$, dado un estado de la naturaleza $\theta_k \in \theta$, se miden a través de una función $f(a_j, \theta_k)$, que puede dimensionarse en términos monetarios o

de-utilidad. Si se conoce la distribución de probabilidad asociada a la ocurrencia de cualquier $\theta_k \in \Theta$, se tiene el caso llamado de riesgo; y si no, se actúa bajo total incertidumbre. Es más, si el grupo de decisión sabe que la probabilidad de ocurrencia de θ_k es igual a uno para una "k" dada, el problema de decisión es determinístico. Los criterios que enmarcan el proceso de decisión varían si el problema es determinístico, bajo riesgo, incertidumbre o conflictivo.

La estadística clásica resuelve problemas de decisión en el caso con riesgo y en el de total incertidumbre, pero sólo si es posible experimentar. Si la experimentación no es factible, el análisis estadístico clásico no es útil para resolver problemas de decisión. En estos casos se recurre a la "teoría de decisión estadística" y en particular a la "teoría bayesiana de decisión" que se basa en el teorema de Bayes. Esta teoría resuelve problemas de decisión, en el caso con riesgo y bajo total incertidumbre, con o sin la presencia de la experimentación.

1) Teoría bayesiana de decisión:

1. Decisión sin experimentación: El criterio de Bayes supone que los estados que presenta la naturaleza son variables aleatorias que pueden o no tener una distribución de probabilidad conocida o estimada. Si esta distribución se conoce o se le puede estimar por datos históricos, entonces

se le llama distribución "a priori". Todas las distribuciones a priori son "subjetivas", ya que se estiman en función de la experiencia o intuición de los individuos que forman el grupo decisor. Sea $P_{\theta}(k)$ la probabilidad de que el estado de la naturaleza sea θ_k .

El criterio de Bayes estipula en este caso, que el decisor, haciendo uso de su distribución a priori, debe seleccionar aquella estrategia que minimice (maximice) su pérdida (ganancia) esperada. Matemáticamente, esto se traduce en que el decisor selecciona a_j si

$\min_k E [f(a_j, \theta_k)]$ es el menor valor esperado de la pérdida para la estrategia a_j .

$$E [f(a_j, \theta_k)] = \begin{cases} \sum_k f(a_j, \theta_k) P_{\theta}(k), & \text{si } \theta_k \text{ tiene una distribución a priori discreta } j=1, 2, \dots \\ \int_{-\infty}^{\infty} f(a_j, y) P_{\theta}(y) dy, & \text{si } \theta_k \text{ tiene una distribución a priori continua.} \end{cases}$$

es el valor esperado de una pérdida, y θ_k tiene una distribución a priori dada (discreta o continua).

2. Decisión con experimentación: Sea X una variable aleatoria que denota la información disponible de una muestra

aleatoria a través de la experimentación (por ejemplo, el valor medio de las observaciones del experimento). El decisor debe seleccionar una serie de reglas, conocidas como "políticas" o "estrategias", que le orientan sobre el uso que deba darle a la información derivada del experimento, con el fin de apoyar su toma de decisiones.

Sea $g(y)$ una función que se define como

$$a = g(y) \text{ si } X = y,$$

es decir, se selecciona la acción "a", si la variable aleatoria X toma el valor "y". El decisor seleccionará, de entre todas las acciones $a_j \in A$ generadas por esta función, aquella que satisfaga cierto criterio de optimalidad. Como "y" es una variable aleatoria, la función $g(y)$ también lo es; por lo tanto, se requiere hablar de valores esperados.

Complementariamente se requiere de otra función que ligue al posible estado de la naturaleza con la acción seleccionada $a_j \in A$, que a su vez se deriva del valor de la variable aleatoria X . Esta función, conocida como "función de riesgo", se define como:

$$R(g(y), \theta_k) = E [r(g(y), \theta_k)] - C$$

donde el valor esperado se toma con respecto a la distribución de la variable aleatoria X y C es el costo del experimento.

El decisor seleccionará aquella acción $a_j \in A$ que, por ejemplo, minimice el valor de la función de riesgo. Sin embargo, como no se sabe que θ ocurrirá, la política $g(y)$ es arbitraria, y el uso de la función de riesgo debe complementarse con las probabilidades que se puedan derivar a partir de las distribuciones a priori y la información derivada de la experimentación.

El principio de Bayes aplicado a la función de riesgo $R(g(y), \theta_k)$, para una distribución discreta de la ocurrencia del estado de la naturaleza θ_k , $P_\theta(k)$, genera la siguiente función "de riesgo ponderado esperado".

$$B[g(y)] = \sum_k R(g(y), \theta_k) P_\theta(k)$$

Para una distribución continua, la función anterior sería

$$B[g(y)] = \int_{-\infty}^{\infty} R(g(y), z) P_\theta(z) dz$$

El criterio de Bayes seleccionaría aquella función $g(y)$ que minimiza el riesgo $B[g(y)]$. Al seleccionar $g(y)$ se escoge, al mismo tiempo, la acción "a". La dificultad consiste en encontrar una metodología que genere sólo el subgrupo de funciones $g(y)$ donde se encuentre la óptima, sin necesidad de una búsqueda exhaustiva de todas estas funciones.

Los siguientes puntos resumen el principio de Bayes, hasta el momento:

a) Si no existe experimentación, se selecciona aquella acción que minimiza (maximiza) la pérdida (ganancia) esperada, calculándose ésta con la distribución a priori de los estados de la naturaleza.

b) Si existe información adicional, ésta se usa para actualizar la distribución a priori de los estados de la naturaleza. La nueva distribución, llamada "a posteriori", es la distribución condicional del estado de la naturaleza θ , dado que el experimento X arroja un cierto valor "y". Con la distribución a posteriori, se calcula una nueva función de riesgo y el criterio de Bayes selecciona aquella acción que minimiza (maximiza) la pérdida (ganancia) esperada de la nueva función.

Si se denota por

$$h_{\theta|X=y}(k) = P\left\{\theta = \theta_k \mid X = y\right\}$$

la distribución a posteriori, cuando θ es una variable aleatoria discreta, o bien $h_{\theta|X=y}(z)$, cuando θ es continua, entonces la distribución a posteriori se calcula de

$$h_{\theta|X=y}(k) = \frac{Q_{X|\theta=k}(y)P_{\theta}(k)}{\sum_{\text{toda } k} Q_{X|\theta=k}(y)P_{\theta}(k)}$$

(expresión útil cuando X y θ tienen distribuciones discretas)

donde

$$Q_{X|\theta=k}(y) = P\{X = y \mid \theta = k\}$$

y $\sum_k Q_{X|O=k}(y)P_{\theta}(k)$ se conoce como "distribución marginal".

La $P_{\theta}(k)$ es la probabilidad a priori $P\{\theta = \theta_k\}$. Las probabilidades condicionales se conocen a través de la información que se obtiene de la experimentación y de los datos históricos.

El proceso bayesiano de decisión consiste en seleccionar aquella acción $a_j \in A$ que optimiza el valor esperado de la función de consecuencias y donde el valor esperado se calcula con las distribuciones a posteriori. Específicamente, se elige aquella $a_j \in A$ que

$$\text{Opt}_{a_j \in A} E f(a_j, \theta_k) = \begin{cases} \sum_k \pi_k f(a_j, \theta_k) h_{\theta|X=y}(y), & \text{si } \theta_k \\ & \text{es discreta} \\ \int_{-\infty}^{\infty} f(a_j, z) h_{\theta|X=y}(z) dz, & \text{si } \theta_k \text{ es} \\ & \text{continua} \end{cases}$$

Si la distribución de X es continua y la de θ es discreta, la distribución a posteriori, escrita $h_{\theta|X=y}(z)$, se calcula de

$$h_{\theta|X=y}(z) = \frac{f_{X|O=k}(y)P_{\theta}(k)}{\int_{-\infty}^{\infty} f_{X|O=z}(y)P_{\theta}(z)dz}$$

donde $P_{\theta}(k)$ es la distribución a priori y $f_{X|O=k}(y)$ es la

función de densidad de la variable aleatoria X , escrita --
 de tal forma que muestra su dependencia en la otra varia-
 ble aleatoria θ . La expresión

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{X|\theta=z}(y) P_{\theta}(z) dz$$

se conoce como "densidad marginal" de la variable aleato-
 ria X .

Si tanto X y θ son variables aleatorias continuas, la fór-
 mula anterior se utiliza igual, pero tomando en cuenta --
 que $P_{\theta}(k)$ es una función de densidad a priori, en vez de --
 una distribución. Por último, si θ es una variable aleato-
 ria continua y X es discreta, se utiliza la fórmula útil-
 para X y θ con distribuciones discretas, con la salvodad-
 de que $P_{\theta}(k)$ es una función de densidad a priori en vez --
 de una distribución.

3. Costo de la información perfecta: La experimentación pro-
 porciona más información (distribución a posteriori), pa-
 ra la toma de decisiones en el marco de total incertidum-
 bre. Sin embargo, ésta tiene un costo y surge la pregunta:
 ¿Hasta qué punto es conveniente pagar por más información

derivada de la experimentación?

Si se tuviera sólo la información de la distribución a --
 priori el beneficio esperado, $E(I)$, sería:

- entonces, X sucesos... $E(I) = \sum_k \text{Opt } f(a_j, \theta_k) P_e(k)$

Esta expresión únicamente dice que si se sabe cuál va a ser el estado de la naturaleza, θ_k , se elige aquella $a_j \in A$ que optimiza la función de consecuencia, $f(a_j, \theta_k)$, para una "k" fija. Por otro lado, el criterio de Bayes sin experimentación (sin distribución a posteriori), calcula el valor esperado de una consecuencia, es decir, $E[f(a_j, \theta)]$, y selecciona aquel que sea mayor (menor) en caso de tratarse de beneficios (pérdidas). La diferencia

$C = \text{Opt } E[f(a_j, \theta_k)] - E(I)$

representa el costo de la información perfecta. Lo anterior significa que si el costo del experimento, C , es menor o igual a \bar{C} , éste se debe llevar a cabo para obtener o estimar las distribuciones a posteriori: si por el contrario C es mayor que \bar{C} , no vale la pena experimentar, es decir, el criterio de Bayes sin información produce más económicamente tan buenos resultados (o mejores) de los que se puedan obtener con experimentación.

ii) Árbol de decisión: El proceso bayesiano de decisión, con o sin experimentación, puede representarse y resolverse gráficamente a través de los llamados "árboles de decisión".

Por medio de este método gráfico, se expresan en orden cronológico las acciones disponibles al decisor y los even-

... aleatorios asociados a los estados de la naturaleza, en un diagrama de árbol.

Los árboles de decisión contemplan dos etapas: diseño y solución. El diseño se hace cronológicamente de izquierda a derecha; la solución, en sentido contrario.

Para el diseño y solución de un árbol de decisión, son necesarios los siguientes elementos:

a) La función de consecuencias, $f(a_j, \theta_k)$.

b) La distribución a priori, $P_\theta(k)$.

c) La distribución a posteriori, $h_{\theta|X=y}(k)$.

d) La distribución marginal, $\sum_{\text{toda } k} Q_{X|\theta=k}(y)P_\theta(k)$.

Con los elementos anteriores se calculan riesgos esperados en el caso sin información y con información, además de riesgos ponderados esperados.

La utilidad del método gráfico del árbol de decisión es más pedagógica e ilustrativa que práctica.

iii) La función de utilidad: La teoría de utilidad proporciona un modelo matemático que describe el comportamiento de un "decisor racional" en un marco de completa incertidumbre.

Para cualquier "decisor racional" existe una función numérica, llamada función de utilidad, definida sobre los eventos de interés, cuya propiedad es que el decisor elegirá la-

alternativa asociada a su preferencia, cuando seleccione ---
aquella acción que maximiza su utilidad esperada.

Para definir el concepto de utilidad debe introducirse ---
y la noción de "lotería de una etapa y de "n" etapas ($n > 1$)".

Una lotería de una etapa es un experimento aleatorio ---
que tiene un conjunto de posibles eventos o resultados ----
 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, cada evento e_j , $j = 1, \dots, m$ con ---
probabilidad de ocurrencia p_j , tal que

$$\sum_{j=1}^m p_j = 1$$
$$0 \leq p_j \leq 1, j = 1, \dots, m.$$

Matemáticamente, una lotería de una etapa se denota por

$$L = \{ (e_1, p_1), (e_2, p_2), \dots, (e_m, p_m) \}.$$

Una lotería de dos etapas es un experimento aleatorio ---
doble. El primer experimento tiene un posible conjunto de ---
eventos o resultados $\{1, 2, \dots, k\}$, cada uno con probabili ---
dad de ocurrencia q_i , $i = 1, \dots, k$, tal que

$$\sum_{i=1}^k q_i = 1$$
$$0 \leq q_i \leq 1; i = 1, \dots, k.$$

Si el resultado del primer experimento es "i", con probabilidad q_i , el jugador tiene acceso al segundo experimento aleatorio, constituido por una lotería de una sola etapa, L_i , tal que

$$L_i = \{ (e_1, p_{i1}), (e_2, p_{i2}), \dots, (e_m, p_{im}) \}; i = 1, \dots, k$$

donde p_{it} es la probabilidad de ocurrencia del evento e_t , $t = 1, \dots, m$, de la lotería L_i , $i = 1, \dots, k$ con

$$\sum_{t=1}^m p_{it} = 1, i = 1, \dots, k$$

$$0 \leq p_{it} \leq 1; t = 1, \dots, m; i = 1, \dots, k.$$

La lotería de dos etapas se puede entonces denotar por,

\bar{L} ,

$$\bar{L} = \{ (q_1, L_1), (q_2, L_2), \dots, (q_k, L_k) \}$$

o más explícitamente

$$\bar{L} = \left\{ q_1 \left[(e_1, p_{11}), \dots, (e_m, p_{1m}) \right], \left[q_2 (e_1, p_{21}), \dots, (e_m, p_{2m}) \right], \dots, \left[q_k (e_1, p_{k1}), \dots, (e_m, p_{km}) \right] \right\}.$$

En resumen, una lotería doble puede expresarse en térmi

nos de una lotería simple donde los eventos con loterías sim-
 ples. En general, una lotería de "n" etapas ($n > 1$), es una
 lotería de una etapa, donde los premios o castigos son loto-
 rías de $(n - 1)$ etapas.

Las loterías pueden representarse gráficamente por me-
 dio de un árbol de decisión.

Ahora, se introduce la definición de función de utili-

dad.

Dado un conjunto de eventos aleatorios $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ asociados a una lotería de una etapa, cualquier deci-
 sor capaz de ordenarlos de acuerdo a cierta preferencia. Su-
 ponga que el orden es tal que e_1 es el evento más preferido-
 por el decisor y e_m es el menos. Considere que por cada even-
 to e_j , $j = 2, \dots, m - 1$, existe una lotería de una etapa, -
 con 2 premios e_1 y e_m , es decir,

$$L = \{(e_1, \mu), (e_m, 1 - \mu)\}, \quad 0 \leq \mu \leq 1.$$

donde μ es la probabilidad de recibir el premio (o castigo)-
 e_1 .

Se le pregunta entonces al decisor para qué valor de la
 probabilidad μ es indiferente entre recibir el premio e_j ,
 $j = 2, \dots, m - 1$, con certeza, o jugar la lotería ante-
 rior. Sea ese valor μ_j . Un decisor racional puede explici-
 tar ese valor μ_j , $0 \leq \mu_j \leq 1$. Finalmente se asocia a e_1 (el
 premio más favorecido) el valor de $\mu_1 = 1$ y a e_m (el premio
 menos favorecido) el valor $\mu_m = 0$. De esta manera se ha ob-
 tenido una función $\mu_j = f(e_j)$ cuyo dominio es el conjunto -

... $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$. Esta función se conoce como "función de utilidad" de un decisor y el número μ_j será la utilidad del evento e_j .

Para cada decisor existirá una función de utilidad diferente. Es más, un mismo decisor podrá cambiar su función de utilidad con el tiempo. Por lo tanto la función de utilidad de un decisor no es única. Obviamente $\mu_j = f(e_j)$ define una variable aleatoria μ , que será la utilidad de la lotería (o "del experimento" aleatorio).

En un lenguaje más simple se puede decir que la utilidad se define como la actitud de un decisor ante la posibilidad de ganar o perder algo en una situación bajo total incertidumbre.

Otra definición, no relacionada con la anterior, es la siguiente. La utilidad de un decisor es una variable aleatoria que mide su actitud ante el riesgo. Esta variable aleatoria es una función cuyo dominio es el espacio de eventos aleatorios $\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ y su rango son los números reales en el conjunto cerrado $[0, 1]$.

Las funciones de utilidad pueden cambiar su escala de medición arbitrariamente. Lo anterior significa que dado

$\mu_j = f(e_j)$ se puede definir una nueva función de utilidad. $\mu'_j = g(e_j)$ donde

$$\mu'_j = a\mu_j + b, a > 0$$

y

$$\mu(e_1) > \mu(e_m).$$

Un decisor racional es aquel cuyo comportamiento de colección de alternativas satisface los siguientes axiomas.

La notación que se utiliza para establecerlos es la siguiente: dados dos eventos cualesquiera e_i y e_j , $i \neq j$; $i, j = 1, \dots, m$, se dice que

$e_i \succ e_j$, significa que el decisor "prefiere" e_i a e_j

$e_i \sim e_j$, significa que el decisor "es indiferente" entre los eventos e_i y e_j

$e_i \succ e_j$, significa que el decisor "prefiere" o "es indiferente" entre los eventos e_i y e_j .

Axioma 1. Preferencia y transitividad de la misma.

Dados dos eventos cualesquiera $e_i, e_j \in E = \{e_1, \dots, e_m\}$, $i \neq j$, sólo persiste una de las siguientes situaciones mutuamente excluyentes:

$e_i \succ e_j$; $e_j \succ e_i$; o $e_i \sim e_j$.

Lás cún, si $e_i \succ e_j$ y $e_j \succ e_t$ entonces $e_i \succ e_t$ para cualquier $i, j, t, i \neq j \neq t$.

Axioma 2. Interdependencia.

Un decisor racional es indiferente entre una lotería \bar{L}

(de dos etapas) y una L (de una etapa) que tiene la misma probabilidad de ocurrencia.

-- existe "i" y "n" en el conjunto de eventos así como

- Axioma 3. Continuidad. Sea $(I \leq i, I \leq n)$ el conjunto de

-- un conjunto de eventos así como el de los otros y sus sucesores

Para cualquier evento $e_j \in E$, diferente de e_1 (el de mayor preferencia) y e_m (el de menor preferencia), el decisor racional es indiferente a que ocurra e_j con certeza o jugar una lotería en donde existen sólo premios, e_1 y e_m . En otras palabras, existe una probabilidad, μ_j , tal que el decisor es indiferente entre una lotería con probabilidad μ_j de ganar e_1 y probabilidad $(1 - \mu_j)$ de ganar e_m , o simplemente obtener e_j con certeza.

- Axioma 4. Continuidad. Sea $(I \leq i, I \leq n)$ el conjunto de

-- un conjunto de eventos así como el de los otros y sus sucesores

Consideré la lotería en una etapa

$$L = \{(e_1, p_1), \dots, (e_m, p_m)\}$$

y la de dos etapas

$$\bar{L} = \{(L_1, p_1), \dots, (L_m, p_m)\}$$

donde la probabilidad de obtener e_j o L_j es la misma, es decir p_j , para toda $j = 1, \dots, m$. Entonces un decisor racional es indiferente entre L y \bar{L} .

Axioma 5. Dadas las loterías cualesquiera, de "n" y "k" etapas --
 respectivamente ($n \geq 1, k \geq 1$), denotadas \bar{L} y L' , entonces --
 prevalece uno y sólo uno de los siguientes tres estados mu-
 tuamente excluyentes: $\bar{L} > L'; L' > \bar{L};$ o $\bar{L} \sim L'$.

Además, prevalece la propiedad de transitividad entre --
 loterías, es decir, si $\bar{L} > L'$ y $L' > L''$, entonces $\bar{L} > L''$.

Axioma 6.

Considere dos loterías L_a y L_b que contienen cada una --
 dos premios (o castigos), e_1 y e_m . Sea p_a la probabilidad --
 asociada a e_1 en la lotería L_a , y p_b la probabilidad de e_1 --
 en L_b .

Entonces

$$\left\{ \begin{matrix} L_a > L_b, & \text{si } p_a > p_b \\ L_a \sim L_b, & \text{si } p_a = p_b \\ L_b > L_a, & \text{si } p_b > p_a. \end{matrix} \right.$$

y

El siguiente resultado de Von Neuman y Morgenstern es --
 fundamental en el proceso de decisión cuando la función de --

consecuencias $f(a_j, \theta_k)$ para toda $a_j \in A$, $\theta_k \in \Theta$, es una función de utilidad.

"Principio básico de decisión". Un decisor racional selecciona, de un conjunto de loterías, aquella que maximiza (minimiza) su utilidad esperada, en caso de que los eventos aleatorios de un experimento sean ganancias (pérdidas).

El principio anterior es a la función de utilidad, lo que el criterio de Bayes es a la función monetaria.

El perfil de una curva de utilidad (construida con las probabilidades que el decisor asocia a los eventos aleatorios) guarda una estrecha relación con la "aversión o propensión al riesgo de un decisor". Si la función de utilidad es cóncava, el decisor tiene aversión al riesgo; si es convexa, propensión al riesgo. Si la gráfica es una línea recta a 45° de cualquier eje coordenado, la función de utilidad es "neutral". Desde luego, los procesos bayesianos de decisión pueden realizarse con funciones de utilidad, el proceso es el mismo para una función de consecuencias dada en unidades monetarias que para una función de consecuencias dada en utilidad para el decisor. El único problema, en el segundo caso, es que se debe construir la función de utilidad.

iv) Análisis de decisiones con objetivos múltiples: Por lo general existe, en un problema de decisión, más de un objetivo entre el grupo de decisores.

Así, en la construcción de los ejes viales de la ciudad

de México se buscaba:
... de México se buscaba: ...

- a) Dar fluidez al tráfico de la ciudad.
- b) Optimizar el transporte de personas y no de vehículos.
- c) Maximizar la seguridad de peatones.
- d) Proporcionar empleo.
- e) Estimular la economía.

En el caso del estudio de un proyecto para un nuevo aeropuerto en la ciudad de México, los objetivos buscados fueron:

- a) Minimizar el costo del gobierno federal.
- b) Aumentar la capacidad aeroportuaria del Valle de México.
- c) Mejorar la seguridad del sistema.
- d) Reducir el nivel de ruido.
- e) Reducir el tiempo de acceso para los usuarios.
- f) Minimizar el desplazamiento de la gente por crecimiento de la ciudad.
- g) Incentivar el desarrollo regional.
- h) Conseguir ciertos objetivos políticos.

Los objetivos tratados en estas circunstancias requieren de ciertas características que los definan y los hagan operacionales (medir el grado en que los diferentes cursos de acción disponibles a un decisor alcanzan los fines propuestos). Estas características se llaman "atributos" y deben tener las siguientes propiedades:

- a) Deben ser un conjunto "completo" para cubrir todos los aspectos importantes del objetivo y, por lo tanto del problema.
- b) Deben ser "operacionales", para que el análisis tenga sentido, es decir, se pueda medir el logro o no del mismo.
- c) Deben poderse "descomponer", para simplificar los aspectos del proceso de evaluación.
- d) Deben ser "no redundantes" para evitar la doble o triple contabilidad.
- e) Deben pertenecer a un "conjunto con un número mínimo" de elementos, para garantizar la relevancia del objetivo.

Definir atributos de un objetivo no es una labor sencilla, requiere de ciertas técnicas (referencia 28).

Por último, existen algunos principios teóricos que fundamentan la construcción de funciones de utilidad multidimensionales y que no se incluyen aquí por motivos de espacio.

Los conceptos que constituyen las bases que sustentan al análisis de decisiones con objetivos múltiples son tratados con amplitud en la referencia 28.

Otra metodología que ataca al problema de objetivos múltiples desde otro punto de vista, se mencionó en la sección-1.3.1.2.6.

1.4 EL FUTURO DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS.

La Ingeniería de Sistemas contempla un gran número de --
 -- conceptos y técnicas modernas que día a día vienen a fortale
 -- cer la tecnología y enfoque que está revolucionando práctica
 mente todas las actividades económicas en la actualidad.

Existen hoy en día una serie de técnicas, tales como la
 descomposición por niveles jerárquicos, cuya aplicación para
 la simplificación de problemas complejos de gran escala hace

posible el análisis sistemático y práctico de una gran fami-
 -- lia de nuevos sistemas de amplio interés para científicos so
 ciales, ingenieros, administradores, abogados, médicos, etc.

Se ha preguntado en alguna ocasión si el enfoque de sig
 temas es sólo producto de una época, y si por lo tanto des--
 -- pués de algunos años pasará a un segundo plano de interés en
 cierta forma análogo al fenómeno de la "Cibernética" y de la
 "Investigación de Operaciones". La Ingeniería de Sistemas, --
 -- sin embargo, no es una nueva disciplina propiamente hablando;
 ni tampoco es una especialidad o ramo de la ciencia que ex--
 -- cluye o desplaza a otras herramientas o conceptos disciplina
 rios. La Ingeniería de Sistemas es sólo un complemento al --
 conocimiento profesional, que permite un mejor y más eficaz
 uso del mismo. La Ingeniería de Sistemas requiere bases dis-
 -- ciplinarias sólidas en campos como las matemáticas, las cien
 -- cias sociales, administración y otras; no se trata de metodo
 -- logías abstractas o conceptos amplios y poco profundos, sino
 de una lógica de análisis y un enfoque que permite la conjun
 -- ción de los puntos de vista de diferentes disciplinas para --
 la solución de problemas complejos, principalmente. Y es por
 esto último que se ha hecho necesario el desarrollo o aplica

"ción de la Ingeniería de Sistemas, pues la escala y diversidad de actividades económicas, sociales y políticas en cada vez más impresionantes en este mundo moderno en que vivimos, haciéndose casi vital la aplicación de esta tecnología. De hecho, tradicionalmente la educación superior ha venido promoviendo la formación de mentalidades ingenieriles, administrativas, etc. Lo cual significa que en los años pasados el ambiente ha estado dominado por una fuerza de trabajo profesional de tipo multidisciplinario; es decir, por conjuntos de individuos o grupos expertos en diferentes temas y actividades. De esta manera se han desarrollado grandes empresas, se han resuelto graves problemas económicos y sociales, y es así como sigue creciendo gran parte del mundo desarrollado actual. Sin embargo, las recientes crisis, tales como las de energéticos, transportes, población y alimentos obligan a aceptar que los recursos no son ilimitados y que es necesario hacer un uso más eficiente del mínimo posible de recursos. En todos los niveles (profesional, comercial, etc.), cada día se hace más imprescindible la conjunción de puntos de vista disciplinarios que generen técnicas y soluciones más efectivas y permanentes, pues ya no es suficiente lograr soluciones, sino se requieren las "mejores soluciones". Esta conjunción de disciplinas debe lograr algo más que la suma directa de diferentes puntos de vista: una nueva visión integral de conjunto que permita obtener realmente más beneficios de los que se esperarían si diversos especialistas realizaran independientemente sus tareas y al final se unieran-

- para presentar los resultados simultáneamente. El "traslape"
 - de enfoques disciplinarios que se requiere para ello es lo
 - que se ha dado en llamar carácter interdisciplinario (y no
 - multidisciplinario) del enfoque de sistemas. Esto es necesario
 - Además, es imperativo estandarizar el concepto represen-
 - tado por el enfoque de sistemas ya que todavía un gran núme-
 - ro de profesionistas se mantienen al margen de este enfoque
 - porque creen que al hablar de sistemas se implica directamen-
 - te el uso desmedido de la computadora o de técnicas matemáti-
 - cas teóricas. Esto ayudaría a un mejor entendimiento y apli-
 - cación de los beneficios reales de este concepto, así como
 - también evitaría la distorsión o subestimación de las ventaj-
 - as y beneficios de los enfoques y métodos clásicos ya com-
 - probados en diferentes disciplinas. Esta labor de estandari-
 - zación requiere la divulgación de los aspectos claves de es-
 - te enfoque (la interdisciplina, la insistencia en criterios
 - cualitativos, la perspectiva integral de los componentes del
 - sistema y sus interacciones, etc.) en los principales cen-
 - tros académicos y áreas profesionales actuales. Sorprendente-
 - mente, durante los últimos años esto se ha logrado con mucho
 - entusiasmo en numerosos países en desarrollo, con el lideraz-
 - go de sociedades profesionales tales como las de ciencias de
 - computación, ciencias administrativas y otras.
 - Por otro lado, existe el peligro de que una mentalidad
 - interdisciplinaria sin intereses específicos o preferencias
 - de tema, tienda hacia lo que clásicamente se llamaría la
 - "superficialidad" de conocimientos. Sin embargo, la Ingenie-
 - ría de Sistemas no implica una visión superficial de las co-

sas, ni tampoco advocating el trabajo individual en la aplicación del enfoque de sistemas, sino la invitación de un grupo de especialistas en varios temas, trabajando en conjunto. Lo anterior significa que la Ingeniería de Sistemas y su enfoque no se pueden definir como una profesión que abarca necesariamente los conocimientos de varias disciplinas; más bien esto es consecuencia natural de la práctica de la Ingeniería de Sistemas y el trabajo interdisciplinario que requiere. El cuerpo de conocimientos que define esta tecnología llamada Ingeniería de Sistemas vendría a ser no sólo las contribuciones de las disciplinas clásicas, sino las de las nuevas herramientas y metodologías tales como los modelos matemáticos, la computación y el propio concepto de la interdisciplina.

A menudo se dice que la Ingeniería de Sistemas y su enfoque no son prácticos debido al tiempo que requiere capacitar personal, investigar, analizar, recomendar soluciones y promover los cambios. La falacia principal de este argumento es precisamente su enfoque "anti-sistemas"; es decir, su visión de que la Ingeniería de Sistemas es sólo un proceso clásico de planeación, diseño e implementación de una solución. La Ingeniería de Sistemas, por lo contrario, es un proceso de cambio gradual, ya que prácticamente desde el arranque se deben estar promoviendo cambios, aunque obviamente de menor trascendencia debido a que en esta etapa aún falta información del detalle del sistema.

La tendencia profesional actual es el trabajo en grupo y la toma de decisiones apoyada por equipos interdisciplina-

rios; estos se debieron en parte a los grandes éxitos de este tipo de estrategia obtenidos en muchos ámbitos económicos y sociales. Sin embargo, no cabe duda de que, a pesar de estos éxitos, la situación es crítica y además es evidente que muchos de los problemas actuales y futuros de la sociedad mundial deben su origen en gran parte a la falta de una adecuada coordinación de planes.

Es necesario que en la educación superior actual, los nuevos currícula y programas de investigación comprendan no sólo el acercamiento físico u organizacional de los representantes de las diferentes disciplinas, sino también la implementación práctica de marcos conceptuales que permitan la unificación efectiva de las disciplinas; de esta manera se formarán profesionistas que realmente puedan dirigir o participar en grupos de trabajo que utilicen el contexto de sistemas.

Se ha explicado cómo la Ingeniería de Sistemas representa el proceso de implementación del enfoque de sistemas, y que éste requiere de la interdisciplina. No es difícil pensar que en un futuro cercano la influencia de la Ingeniería de Sistemas logre la restructuración drástica de una gran cantidad de currícula a nivel licenciatura. Esto se observa en E.E.U.U., en el caso de los programas de administración de empresas a nivel licenciatura, los cuales han ido desapareciendo y han pasado a ser parte de programas de maestría o doctorado con un gran número de materias optativas en diferentes disciplinas. Ciertamente, las profesiones se encuentran en medio de un proceso de evolución, que las lleva hacia una visión más amplia de las cosas que nos rodean.

Lo anterior no significa que la tendencia actual hacia la especialización sea negativa, sólo es necesario adecuar los programas de estudio a la preparación de los profesionistas en los conceptos básicos comunes a todas las áreas y la aplicación del enfoque de sistemas tanto en la preparación académica como en la práctica profesional.

Como se puede constatar, pese a los obstáculos que se presentan, el futuro de la Ingeniería de Sistemas es seguro y prometedor. La Ingeniería de Sistemas se revela como una metodología y un conjunto de técnicas de gran potencial, que abre un nuevo camino en la obtención de soluciones novedosas, diferentes y mejores para los problemas complejos que la vida moderna nos plantea. La implementación de este enfoque de sistemas permitirá satisfacer no sólo las necesidades presentes, sino también las futuras alcanzando y beneficiando de este modo a las generaciones venideras.

Por su parte la Investigación de Operaciones, con tan sólo 30 años de edad, representa un campo fértil para la investigación y el desarrollo de nuevas técnicas capaces de dar solución a los problemas que actualmente carecen de ella. Cabe esperar, entonces que los modelos disponibles a la fecha se perfeccionen y que se desarrollen nuevos algoritmos.

Pues bien, tal evolución de métodos y modelos ha comenzado a dar frutos recientemente. Se han encontrado ya nuevas técnicas tendientes a simplificar los métodos originales y a obtener mejores respuestas. Como ejemplo citaremos un nuevo y poderoso algoritmo de programación lineal:

El matemático soviético L. G. Khachian ha desarrollado-

un novedoso algoritmo que ofrece una respuesta a problemas -
 -ciertos, hasta ahora, se habían considerado insolubles.
 - En 1979, Khachiyan publicó en "Doklady", -
 - una de las revistas de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética, -
 - los lineamientos de un algoritmo totalmente nuevo para -
 - la programación lineal que garantiza un crecimiento -
 - geométrico en el tiempo que utiliza para alcanzar su solu-
 - ción. Este algoritmo, más conocido, Peter Gacs y Basile Lo-
 - evsky, matemáticos húngaros, comprobaron el algoritmo de Kha-
 - chiyan. Este algoritmo difiere completamente de cual-
 - -quier otro prometido con anterioridad. En lugar de seguir -
 - -los vértices del método simplex o trazar las ramas de un ár-
 - -bol de decisión, Khachiyan hace uso de la geometría euclídea -
 - -una extendida a espacios de dimensiones mayores.
 - - La idea clave consiste en construir una sucesión de -
 - -elipsoides de gran dimensión que se desplazan lateralmente -
 - - (bajo la influencia de los planos de restricciones que for-
 - -man el método simplex), de tal manera que sus centros conver-
 - -gen gradualmente en la solución. Los volúmenes de los elip-
 - -soides decrecen gradualmente, y aseguran así que la solución -
 - -será alcanzada en un número razonable de pasos. Cuando se es-
 - -cribió en fórmulas, el algoritmo de Khachiyan, dada su simple-
 - -za, puede ser programado en una calculadora manual. Su utili-
 - -zación no es más compleja que la del método simplex, y quan-
 - -do se entiende completamente, puede ser más sencilla.
 - - Por lo tanto, a pesar de que el algoritmo simplex se ha
 - - usado con éxito durante un cuarto de siglo, resulta que en -

...sólo constituyen un método, así como cualquier otro método. La realidad no es el único método, ni siquiera el mejor, para resolver problemas de programación lineal. Además, el esquema presentado por Khachian ofrece la posibilidad de atacar los problemas de programación lineal con crecimiento de tiempo no geométrico, al reducirlos a problemas con crecimiento geométrico. Tal vez hasta sea posible romper la barrera de los problemas con crecimiento no geométrico (por ejemplo, exponencial) al encontrar la solución en tiempo geométrico.

Lo que más importa es que esto es una idea totalmente nueva, un sueño que revela el beneficio de la acción recíproca entre el álgebra y la geometría. El método Khachian parece contener mayor "inteligencia" que el método simplex de Dantzig, ya que puede sacrificar con el fin de obtener mejores resultados, más adelante; mientras que el método simplex, a medida que se mueve de un vértice a otro, invariablemente deja a un lado las posibilidades de sacrificio que tal vez podrían conducir a una mayor ganancia.

Sin embargo, nadie entiende por completo todavía cómo opera el algoritmo de Khachian, ni cómo los elipsoides móviles de Khachian pueden comportarse como si fuesen inteligentes.

Mayor información sobre este algoritmo, puede obtenerse en "Science News", The Weekly News Magazine of Science, 6 de octubre de 1979; bajo el título de "Linear Programming: Solid New Algorithm".

Otro avance reciente en programación lineal es un algoritmo polinomial que, a juicio de algunos prestigiosos científicos, representa la mayor aportación al campo de las mate

máticas aplicadas, en los últimos veinticinco años.

Este método pretende, dado un sistema de dos o más desigualdades lineales para dos o más variables reales, construir un algoritmo polinomial que determine la consistencia o inconsistencia de un sistema, en un espacio real de múltiples dimensiones. En otras palabras, se intenta obtener una solución polinomial de problemas de programación lineal. Pero debido a que una exposición completa y clara de este nuevo algoritmo requiere de amplios conocimientos y varios conceptos acerca de sistema binario, programación y computación (máquinas deterministas turing), geometría euclidiana, y álgebra lineal, para nuestro propósito es suficiente mencionar su existencia.

Los detalles de este algoritmo polinomial pueden consultarse en "A Polynomial Algorithm in Linear Programming", -- Soviet Mathematics-Doklady, vol. 20, núm. 1, pp. 191-194, -- 1979.

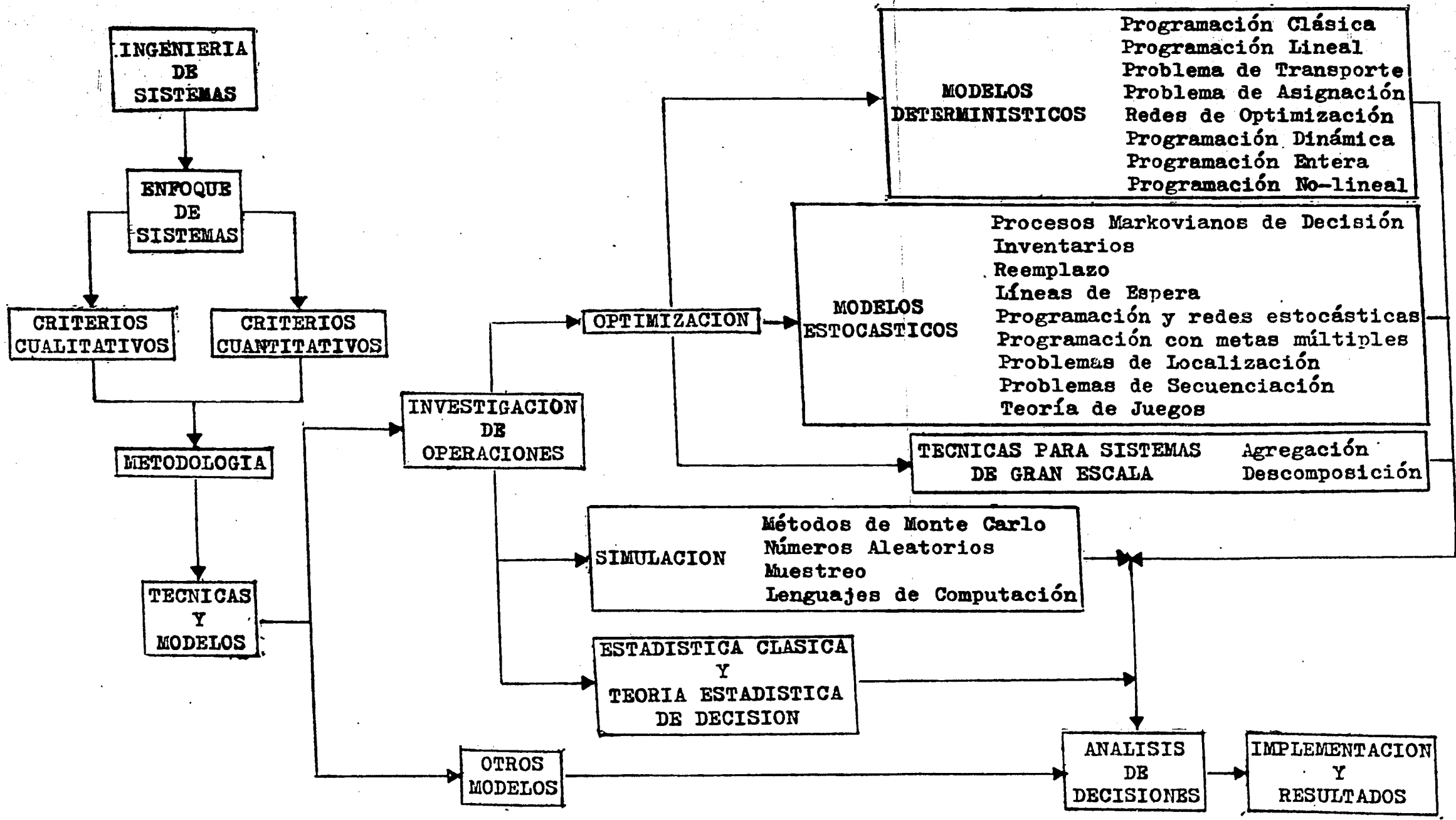


Fig. 1.15 Resumen esquemático del primer capítulo.

no tiene el no acobardado cobardes con los movimientos de
en efecto con los que se venía a ser el mundo de la
-cobardes con los movimientos de cobardes con los movimientos
- cobardes con los movimientos de cobardes con los movimientos
2. SISTEMAS DE TRANSPORTE.

2.1 INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE.

Desde los inicios de la civilización los transportes -- han mantenido una estrecha relación con las transformaciones económicas y sociales del mundo. Nuestra civilización no podría existir sin los transportes, que forman verdaderas arterias del organismo social. Su historia se pierde en la noche de los tiempos iniciada cuando el hombre prehistórico decidió cargar los productos de la caza o de la pesca sobre sus espaldas.

La existencia de las primeras ciudades de la antigüedad dependió en gran medida de las posibilidades de los medios de transporte; las primeras civilizaciones se agruparon en las orillas de los ríos y cerca del mar con lo cual el transporte fluvial vino a constituir un sistema de transporte muy importante en esos tiempos.

Los transportes terrestres han estado ligados al desarrollo de la vida agrícola y con ésta han aparecido los primeros grandes descubrimientos de este tipo de transportes.

Los transportes han precisado siempre de un consumo de energía que se traduce en movimiento. Hombres, animales y má

quinas constituyen los tres estadios básicos en la evolución del transporte; si bien los dos primeros hoy son tan sólo reliquias históricas con alguna permanencia en las sociedades humanas más atrasadas, ha sido la máquina la que realmente ha liberado al hombre.

Sobre la tierra, la rueda y el camino son los hitos fundamentales del transporte. Sobre las aguas, la naturaleza ha proporcionado el camino en los ríos navegables, en los lagos y en el ancho mar, pero el hombre ha aportado los canales y ha mejorado las condiciones de aprovechamiento de los cursos del agua y el enlace tierra-agua a través de los puertos. Sobre los aires, el hombre ha hecho realidad el mito de Icaro y se empeña hoy en la conquista de las estrellas.

El agua ha sido siempre el camino más fácil, y el mar, la ruta más seguida por las civilizaciones. Del remo y el viento, la navegación ha pasado al vapor, el petróleo y la energía nuclear. De los trirremes romanos a los trasatlánticos y los grandes cargueros; y cuando el navegar deja de ser aventura y el mar un mundo peligroso, las costas y su prolongación interior a través de canales y ríos navegables atraen una parte cada vez mayor de la población humana.

La tierra ha impuesto siempre mayores dificultades al transporte y, sobre todo, un mayor consumo de energía. El abandono y la ruina de las calzadas romanas trajo consigo la desintegración de los pueblos del imperio. Caminos reales, casas de postas y diligencias fueron recnudando, con lentitud de siglos, los trozos rotos y dispersos facilitando la unión política a través de la creación de las nacionalidades.

Por lo que el ferrocarril quien, en la segunda mitad del siglo XIX, hizo posible las grandes ciudades interiores fuera del alcance de la navegación. La carretera y el automóvil han proporcionado al hombre su máximo nivel de libertad a ras del suelo.

El aire ha sido el reino vedado al hombre por más largo tiempo. La aviación es la última en arribar al mundo del transporte, pero la que ha proporcionado la victoria final sobre el tiempo y el espacio. La geografía no impone al nuevo medio más limitación que una cómoda localización de los aeropuertos, en pugna con la proximidad de las grandes áreas urbanas y las posibles dificultades orográficas y climatológicas. Las crecientes velocidades comerciales han empujado al mundo físico en que el hombre desenvuelve su actividad. El mundo actual es un mundo en constante movimiento, en que los transportes han permitido superar las barreras del tiempo y del espacio. El hombre ya no está obligado a residir en las proximidades del lugar donde trabaja; las ciudades se alimentan de productos obtenidos en lejanas tierras, las fábricas utilizan materiales procedentes de otros continentes y la energía que demandan los procesos económicos fluye al lugar que se precisa desde los más remotos rincones del planeta.

Los transportes han hecho posible la unidad del mundo, pero también la diversidad que ofrece tras un largo proceso evolutivo.

Por otra parte, el sistema económico de nuestro país es tá compuesto por tres sectores (ver figura 2.1).

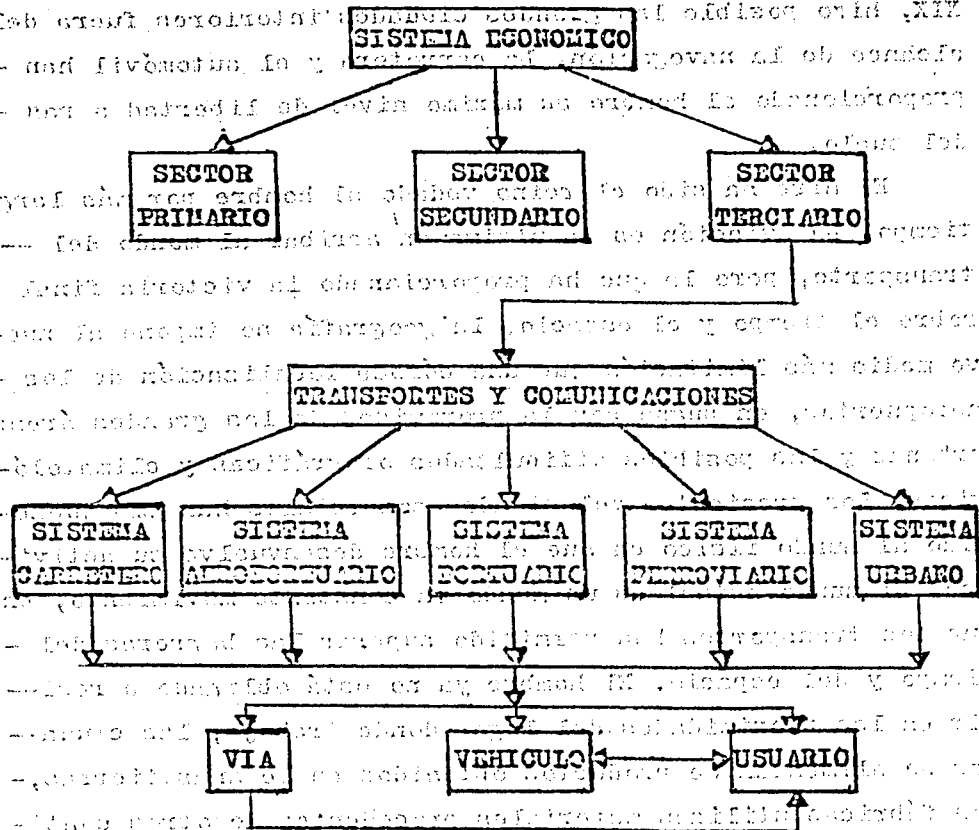


Fig. 2.1 Los transportes en el sistema económico.

segundo día de agosto de 1968

1. Sector Primario: actividades agropastorales y extractivas.

2. Sector Secundario: actividades industriales y de transformación.

3. Sector Terciario: actividades de servicios.

En el tercer sector del sistema económico, donde los sistemas de transporte y comunicación se encuentran ubicados.

Los sistemas de transporte son importantes en la economía de un país, porque tienen la función de unir la oferta con la demanda, esto es, realizan un intercambio de bienes y servicios que requiere la sociedad.

Los sistemas de transporte se dividen en tres grandes sistemas: el sistema terrestre, el sistema aéreo y el sistema fluvial (también llamado marítimo o acuático).

Los sistemas de transportación terrestre incluyen carreteras, ferrovías y ductos.

Los sistemas de transportación aérea comprenden los aeropuertos.

Y los sistemas de transportación fluvial se integran con los puertos.

Los elementos básicos que componen un sistema de transporte son tres: la vía, el vehículo y el usuario o la carga. Por ejemplo, tomando como modelo el sistema terrestre tenemos:

Vía: carreteras, ferrovías y ductos.

Vehículo: automóviles, camiones y ferrocarriles.

Usuario: pasajeros y/o carga.

----- y es importante que se aborden los siguientes aspectos: .1

Así tenemos que el transporte, que etimológicamente significa "trans": a través de; y "porto": llevar o cambiar de lugar, se puede realizar mediante los diversos sistemas.

Dado el carácter masivo que presenta el transporte en nuestro país, una vez que el desarrollo económico se acelera, resulta de gran significado económico la minimización de los costos en los desplazamientos mediante el mejoramiento de los sistemas de transporte, lo que se traduce en una liberación de recursos susceptibles de coadyuvar al incremento de la tasa de inversión nacional y, en general, a acelerar el proceso de desarrollo de los países. *en el primer capítulo de la obra*

----- Antes de entrar al análisis de los sistemas de transporte, es pertinente mencionar los puntos que en general forman parte del proceso de planeación de los sistemas, ya que dentro de esta etapa es fundamental contar con una herramienta tan eficiente como es la Ingeniería de Sistemas y sus modelos mencionados en este trabajo. *segundo capítulo de la obra*

Los lineamientos generales para un proceso de planeación en los sistemas de transporte son:

- a) Diagnóstico, que comprende el conocimiento de la oferta y de la demanda del transporte actual.
- b) Creación de organismos que materialicen el deseo de la comunidad por resolver el problema.
- c) Fijación de metas y objetivos, que señalen lo que se quiere lograr en cuanto a la satisfacción de la demanda, modi

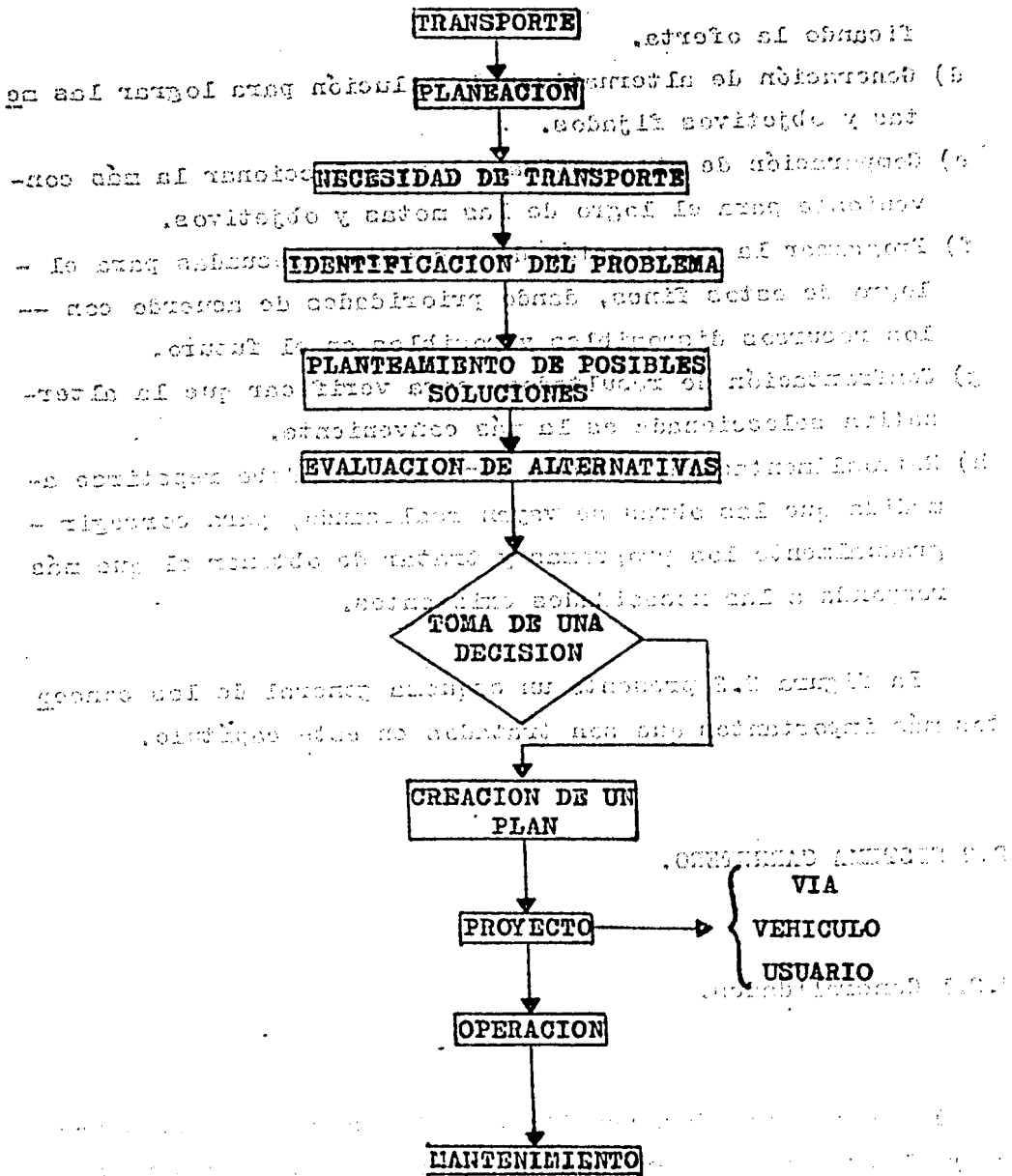


Fig. 2.2 Aspectos importantes de un sistema de transporte.

ficando la oferta.

- d) Generación de alternativas de solución para lograr las metas y objetivos fijados.
- e) Comparación de alternativas, para seleccionar la más conveniente para el logro de las metas y objetivos.
- f) Programar la realización de las obras adecuadas para el logro de estos fines, dando prioridades de acuerdo con los recursos disponibles y posibles en el futuro.
- g) Confrontación de resultados, para verificar que la alternativa seleccionada es la más conveniente.
- h) Retroalimentación, proceso dinámico que debe repetirse a medida que las obras se vayan realizando, para corregir gradualmente los programas y tratar de obtener el que más responda a las necesidades existentes.

La figura 2.2 presenta un esquema general de los conceptos más importantes que son tratados en este capítulo.

2.2 SISTEMA CARRETERO.

2.2.1 Generalidades.

Las carreteras han permitido el intercambio de productos y el traslado de personas de manera fácil, segura y permanente entre los principales centros de población, al mismo

tiempo que han permitido incorporar a la actividad productiva amplias regiones del territorio nacional.

La construcción de caminos en México data de la época de los Aztecas y los Mayas que fueron los más adelantados; todavía se admiran sus obras como el "Camino Blanco de los Mayas" y el "Camino México-Tacubaya" de los Aztecas.

Una vez realizada la conquista por los españoles, se construyó un gran número de caminos tales como el camino México-Veracruz que entró en funcionamiento en 1522. Así, año tras año a través de nuestra historia, se fueron desarrollando desde caminos de brecha hasta grandes e importantes carreteras con lo cual nuestro país se ha integrado.

Actualmente existen en México 208 000 km de carreteras, con una influencia muy grande en el desarrollo del país y comunicando 32 000 localidades.

Tomando en cuenta sus efectos, las carreteras pueden ser:

- a) Carreteras de Función Social.
- b) Carreteras de Penetración Económica.
- c) Carreteras en Zonas Desarrolladas.

De acuerdo a su construcción y operación, las carreteras se han clasificado en:

- a) Carreteras Federales: Construidas y mantenidas totalmente por el gobierno federal.
- b) Carreteras Estatales o Bipartitas: Son aquellas en las --

CLASIFICACION DE CARRETERAS DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL PROYECTO

Características	Unidad	Especial	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E
Velocidad Max. del Proyecto	Km/h	110-60 9-13.5(2 carriles)	110-50	80-30	70-25	60-20	60-30
Ancho de corona	m.	22.5 de(2 carriles)	9:00-8:00	8.00-7:00	7.00-7:00	6.00-6.00	4.00-4.00
Ancho de calzada	m.	9.00	7:30-6:30	6.50-5.70	6.10-5.50	5.50-5.50	4.00-4.00
Grado Max. de curvatura	(°)	3.00-11.00	3.00-11.00	5.50-64.00	7.30-70.00	12.00-70.00	11-62
Radio mínimo de curvatura	m.	496.56	381.97	208.35	152.79	95.49	60.48
Pendiente gobernadora	%	2.5	2.5	3.0	3.5	5.0	5.0
Pendiente máxima	%	4.00-6.00	4.00-7.00	4.5-8.00	5.0-10.0	6.0-14.0	6-15
Sobre elevación máxima	%	10.0	10-12	10.0-10.0	10.0-10.0	10.0-10.0	10.0-10.0
Bombec	%	2	2	2	2-3	2-3	2-3
Drenaje		Definitivos	Definitivos	Definitivos	Definitivos	Algo semidefinitivos. Revestida en lo necesario.	Semidefinitivos y provisional. Revestida en lo necesario.
Superficie de rodamiento		Pavimentadas	Pavimentadas	Pavimentadas	Pavimentadas		
T.D.P.A. Máximo		3 000	3 000	1 500	1 000	500	400
Vehículo del Proyecto		-610	De-610	De-610	De-610	De-450	De-450
Rel. Peso/Potencia	Kg/Hp	120	120	120	120	90	90

NOTA: las variaciones toman en cuenta el tipo de terreno en que se construirá la carretera. Tabla 2.1

cuales el gobierno federal coopera en su construcción y/o conservación con un 50% del costo y el gobierno estatal aporta el otro 50%.

c) Carreteras en Cooperación o Tripartitas: En este tipo de carreteras participan la Federación, el Estado y particulares con una cooperación del 33.33% del costo, cada uno.

d) Carreteras Particulares: Son aquellas construidas en un 100% por particulares.

e) Otras.

Desde el punto de vista de sus características geométricas las carreteras se han clasificado en seis clases, como se puede ver en la tabla 2.1. Dichas clases son: Espaciales, Tipo A, Tipo B, Tipo C, Tipo D, Tipo E.

Por su superficie de rodamiento, las carreteras pueden ser: pavimentadas, revestidas, de terracerías, brechas.

Por su importancia, las carreteras se clasifican como: troncales, alimentadoras o secundarias, terciarias.

2.2.2 Planeación.

México es un país que no se ha desarrollado plenamente en forma deseable, por lo cual la infraestructura carretera aún tiene mucho por emprender dado que existe mucho por hacer.

La Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas

(SAHOP) tiene a su cargo la planeación, los proyectos, la construcción y la conservación de las carreteras. Por estos motivos, ha preparado una serie de planes que permitan cumplir con el objetivo deseado; cubriendo desde el aspecto nacional, pasando por el regional, hasta el nivel estatal. Las necesidades que el sistema carretero debe satisfacer frente al desarrollo económico y social de México son:

- a) Se debe aceptar que si bien la red de transportes básica o troncal, cumple en buena medida con los objetivos señalados para ella, faltan todavía por construir importantes obras que deberán atacarse con inversiones que correspondan al justo tamaño para la demanda prevista.
- b) Las redes alimentadoras deberán tener una evolución similar o mayor a la red básica.
- c) Se deberán promover con vías de aprovechamiento los centros de población que no están integrados totalmente.

Estas necesidades quedan definidas en las metas por alcanzarse de los planes.

Los instrumentos que conforman la planeación de carreteras son: el Esquema Director de Carreteras, el Plan Nacional de Modernizaciones y los Planes Estatales de Carreteras.

En la elaboración de estos planes, efectuada en la Dirección General de Análisis de Inversiones de SAHOP, se han tomado en cuenta aspectos económicos, políticos-administrativos, demográficos, de ordenación del territorio, de crecimiento futuro, para poder llevar a cabo la planeación de comuni-

cación carretera en nuestro país.

protección al equilibrio algunos del desarrollo de la

2.2.2.1 Esquema Director de Carreteras.

sup. orden, conservar y estabilizar estructura del territorio

de orden económico y social existente en el país, de modo

En un país como el nuestro, en donde la ubicación de

las actividades económicas está influenciada por la red ca-

rrertera, el crecimiento de la economía depende en gran parte

de la estructura de esta red. Con esta preocupación, la Se-

cretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas tomó la

tarea de elaborar el estudio "Esquema Director de Carreteras"

mediante el cual se plantea la red básica deseable para el

país en el año de 1995, incluyendo tanto las nuevas propor-

ciones como el acondicionamiento de los tramos actuales o de

los que se vayan construyendo en el plazo inmediato.

La red resultante al año 1995 deberá responder a los ob-

jetivos de ordenación del territorio y a los grandes objeti-

vos económicos, y en forma específica facilitar el funciona-

miento adecuado de los flujos de tránsito previstos.

Se proponen tres redes para obtener el objetivo plantea-

do por el esquema director:

1. Red estructurante de primer orden.

a) Red Estructurante de Primer Orden.

b) Red Estructurante de Segundo Orden.

c) Red Secundaria.

Los aspectos más importantes del Esquema Director de Ca

reteras son tratados a continuación.

- i) Estructuración del espacio geográfico: La estructura del espacio geográfico trata de las relaciones existentes entre las diversas localidades y regiones, puesto que -- una región entre más relaciones internas y externas tenga o -- realice, mayor será su tendencia a desarrollarse; por lo -- -- cual es importante preparar la estructuración de su espacio. -- -- A nivel nacional, la estructuración del territorio rela -- -- ciona las principales regiones y particularmente las princi -- -- pales ciudades, ya que son la expresión del desarrollo del -- -- territorio. -- --
- ii) Jerarquía urbana: Para delinear la jerarquía urbana -- -- utilizada en el Esquema Director de Carreteras, se tomó de -- -- base la población que cada aglomeración tendrá en 1995 y se -- -- establecieron seis niveles. El nivel superior (primero) co -- -- rresponde a las metrópolis regionales y el nivel más bajo -- -- (sexto) a los centros regionales. También se conjugaron fac -- -- tores como ingresos declarados por habitante, producción in -- -- dustrial de las aglomeraciones, tiempos de recorrido, etc.

iii) Análisis de tránsito por carretera: Se lleva a cabo -- -- para un conjunto de tramos, tratando de abarcar de una mane -- -- ra aproximada a toda la red federal. Los flujos observados -- -- se complementaron con datos sobre las características geomé -- -- tricas de cada tramo. Se dividió el tránsito en: largo itine -- -- rario y tránsito local.

La evolución de los tránsitos interurbanos se supuso ligada al avance de los factores emisivos y atractivos de su origen y destino, así como la supuesta variación de los tiempos de recorrido.

La evolución de los tránsitos locales se estimó ligada al desarrollo local y se determina a nivel estatal.

2.2.2.2 Plan Nacional de Modernizaciones.

En la preparación de planes para la infraestructura del transporte, la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas ha tenido presente un conjunto de metas parciales que se identifican con las políticas, buscando el máximo rendimiento y la plena utilización de las obras realizadas.

Para satisfacer adecuadamente las necesidades que al sistema de transporte corresponden ante el desarrollo económico y social del país, es inaplazable la modernización integral de las rutas nacionales más utilizadas.

Esto es muy importante puesto que las condiciones de circulación han cambiado en los últimos años, trayendo como consecuencia congestión y deterioro de algunos caminos, lo cual se traduce en pérdidas económicas y bajos niveles de seguridad.

La interacción de los elementos, tránsito y carreteras, hicieron necesaria la formulación de un plan de modernización de la red carretera que, además de cumplir con los obje

tivos generales del sector y apoyar el Plan Nacional de Desarrollo Urbano, cumpliera con los siguientes lineamientos:

- a) Garantizar un nivel de servicio adecuado a las necesidades de los usuarios y acorde al desarrollo de la zona donde se localizan los cambios.
- b) Proporcionar mayores niveles de seguridad en las carreteras.
- c) Proporcionar la continuidad en los recorridos mediante la homogenización de las características geométricas de la red carretera.
- d) Aprovechar al máximo posible las inversiones realizadas con anterioridad.
- e) Terminar, al ritmo conveniente, las obras que se encuentran en proceso, buscando la pronta obtención de los beneficios y asegurando así la continuidad en el proceso.

La aplicación de estos lineamientos se ve concretizada con la realización de obras que se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) Reconstrucciones.
- b) Mejoramientos.
- c) Aumento en el número de carriles.

El Plan Nacional de Modernizaciones contiene un número considerable de tramos carreteros que requieren modernización, pero debido a la limitación de recursos con que cuenta

en el país, no es posible pensar en que se puedan llevar a cabo en el corto plazo. Por tal motivo, fue necesario hacer una selección de aquellos tramos que requieren con mayor urgencia de acciones que les permitan contribuir en forma eficiente al desarrollo económico del país. Estas obras seleccionadas constituyen el Programa de Modernización. Para la selección de cada una de ellas se consideraron en términos generales, los aspectos de tránsito, capacidad de la carretera y su contribución al fortalecimiento de los sistemas de transporte.

2.2.2.3 Planes Estatales de Carreteras.

El objetivo de los Planes Estatales de Carreteras consiste esencialmente en identificar carreteras alimentadoras—es decir, estatales, vecinales y rurales, sin excluir posibles carreteras troncales.

Para ello, se analizan los alcances carreteros descentralizados a nivel estatal desde tres puntos de vista distintos: político-administrativo, económico, y urbano y de ordenación territorial.

Independientemente del punto de vista de análisis, se han adoptado los siguientes criterios generales:

- a) Proporcionar la descentralización de las grandes metrópolis y la concentración de la población rural dispersa.

- b) Extender las actividades agrícolas hacia regiones de mayor productividad natural para lograr la autosuficiencia del país en materia de productos básicos.
- c) Abatir los costos de transportes en las zonas de influencia de las carreteras existentes que lo requieran.
- d) Permitir que los procesos elaborados lleguen fácilmente a las comunidades rurales.
- e) Permitir el acceso a todo el territorio que lo requiera.

i) Criterio político-administrativo: El criterio adoptado

para fijar las ligas más convenientes desde el punto de vista político-administrativo consiste en unir, en la medida de lo posible, todas las cabeceras municipales con la capital del estado; también se proponen ligas para comunicar a las poblaciones que denotan una importancia política o administrativa sin ser cabecera municipal.

ii) Criterio económico: El análisis de la red deseable desde el punto de vista económico, se lleva a cabo determinando cuáles son los centros productores y cuáles los consumidores, a nivel estatal, fijando los enlaces deseables en función del flujo de productos. El estudio fue dividido en este renglón, en siete etapas que corresponden a las relaciones producto-consumo en las siguientes actividades: agricultura, ganadería, silvicultura, pesca, minería, industria, turismo.

iii) Criterio de desarrollo y de ordenación del territorio

rio: La consideración de este criterio en los Planes Estatales de Carreteras, tiene como objetivo fundamental el contribuir a detectar y proponer carreteras que aceleren el proceso de descentralización y que proporcionen la ordenación del territorio nacional. Para ello, se ha tomado como base los lineamientos indicados en el Plan Nacional de Desarrollo Urbano, apoyados además por sectores demográficos como las tasas de crecimiento de las distintas localidades, su dinámica y por la delimitación de áreas de influencia en donde influyen de manera importante los rasgos topográficos y económicos.

2.2.3 Proyectos y su evaluación.

La evaluación de proyectos pretende relacionar en general los efectos principales de la inversión con los costos totales asociados a un proyecto, ambos cuantificados a lo largo de un período usualmente llamado "horizonte económico".

De acuerdo con los efectos de las carreteras es como se podrá llevar a cabo su evaluación, así tenemos que para las:

- a) Carreteras de función social, cuya finalidad es integrar a la red vial del país las poblaciones, independientemente del potencial económico de la zona donde se ubican. El índice de evaluación es el costo/habitante servido, el cual no nos da una idea clara de la bondad del proyecto, -

pero sí permite jerarquizarlos entre sí.

b) Carreteras de penetración económica, cuya finalidad es integrar a la economía del país las regiones que cuentan con recursos potenciales susceptibles de aprovecharse. Los indicadores de evaluación con la Tasa Interna de Retorno (TIR) o Tasa Anual de Rendimiento (entendida como la tasa que permite igualar el flujo de los beneficios con el de los costos, en el horizonte económico) y el Índice de Rentabilidad (la resolución de las sumatorias de beneficios actualizados entre la de costos actualizados), donde los beneficios que se consideran son el incremento a la producción agropecuaria (agricultura y ganadería) y los ahorros en costos de transportación de los excedentes de la producción existente en la zona de influencia directa del camino; los costos son los de construcción, conservación y reconstrucción en el horizonte económico considerado.

c) Carreteras en zonas desarrolladas, cuya finalidad es mejorar las condiciones del transporte en zonas ya comunicadas con carreteras. El indicador de evaluación, en estos casos, es también el Índice de Rentabilidad y la Tasa Interna de Retorno, pero los beneficios considerados son el valor en dinero de los ahorros en tiempo de los usuarios, los ahorros en costos de operación de los vehículos tanto por mejores condiciones de circulación como por la supresión de congestionamientos, y los costos, como construcción, conservación y reconstrucción.

El proyecto geométrico de un camino se basa en el conocimiento de los tres elementos básicos que constituyen el sistema de transporte.

2.2.3.1 Vía.

1) Elementos de una carretera (ver figura 2.3):

1. **Terracerías de Terraplén:** Están constituidas por un conjunto de diferentes tipos de material compacto que proporcionan un soporte adecuado a las capas superiores.
2. **Escalones de Liga:** Son los que se forman en el área de desplante de un terraplén cuando la pendiente transversal del terreno es poco menor que la inclinación del talud, a fin de obtener una liga adecuada entre ellos y evitar un deslizamiento del terraplén.
3. **Muros de contención:** Cuando la línea de ceros del terraplén no llega al terreno natural es necesario construir muros de retención, cuya ubicación y altura estarán dadas como resultado de un estudio económico.
4. **Talud de Terraplén:** Es la inclinación del paramento de los terraplenes, expresado numéricamente por el recíproco de la pendiente.
5. **Capa Sub-rasante:** Es la porción superior a las terracerías, tanto en corte como en terraplén, su espesor es comúnmente de 30 cm y está formada por suelos seleccionados

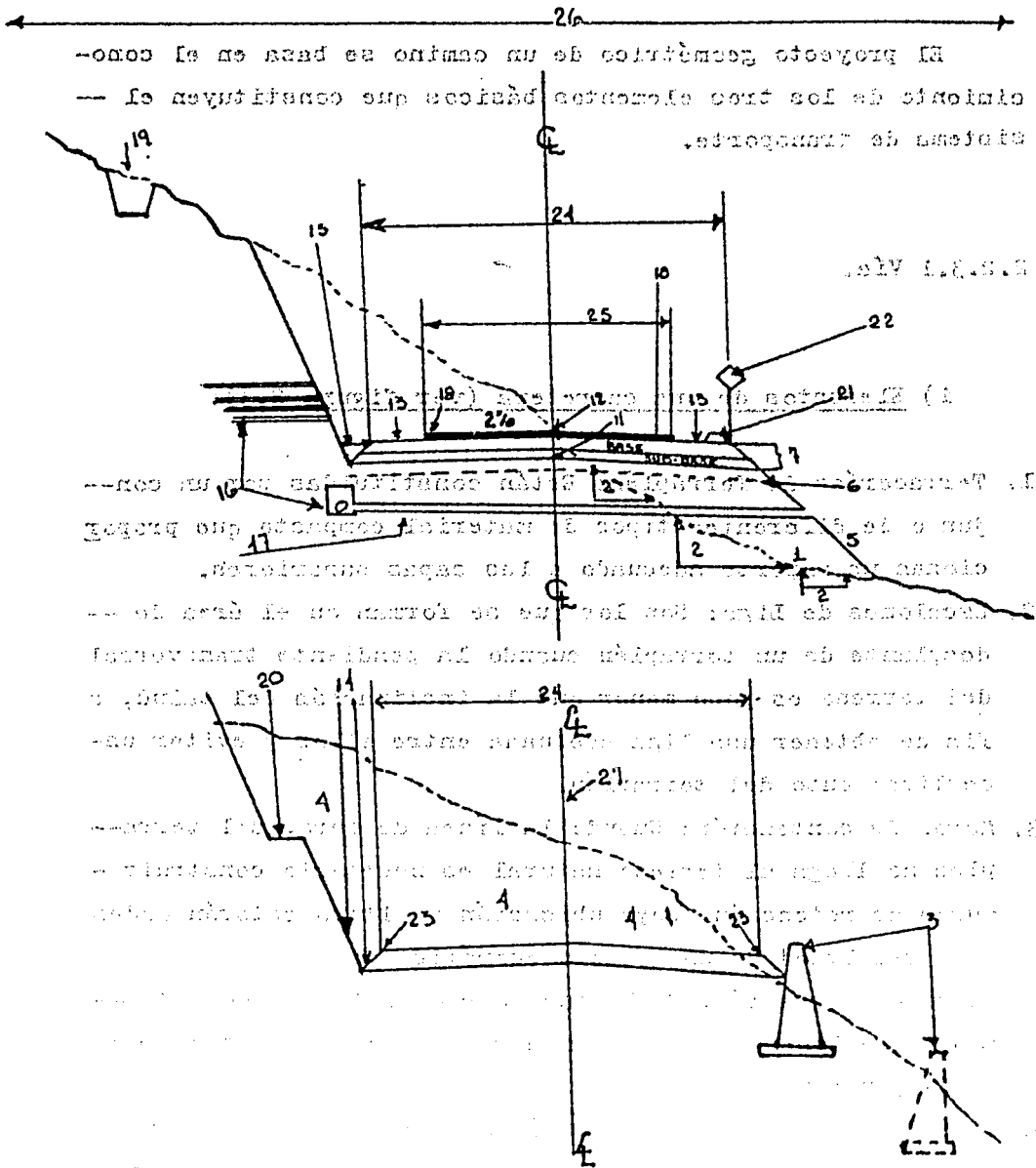


Figura. 2.3

otro para soportar las cargas que le transmiten las capas superiores del pavimento.

6. **Pavimento:** Conjunto de capas de materiales compactos que permiten transmitir adecuadamente las cargas de los vehículos a las capas inferiores y al terreno natural, las capas que lo integran son: la sub-rasante, la base y la carpeta.

7. **Sub-Base:** Capa de materiales graduados y compactos inmediatamente arriba de la terracería y la capa sub-rasante, cuya función es de carácter económico debido a que reduce el costo del pavimento cuando éste es de espesor considerable.

8. **Base:** Capa de materiales graduados altamente compactos situados arriba de la capa sub-base y cuya función es la de permitir reducir el espesor de la carpeta que es más costosa y ayuda a transmitir la carga que es producida por el tránsito a la sub-base y a la sub-rasante.

9. **Carpeta:** Capa superior de una carretera de materiales graduados, la cual debe proporcionar una superficie de rodamiento adecuada con textura y color convenientes que resista los efectos abrasivos del tráfico.

10. **Sub-Rasante:** Es la línea imaginaria que marca el eje del camino a la altura de la capa sub-rasante.

11. **Rasante:** Es la línea imaginaria sobre la superficie de rodamiento que corre a lo largo del eje de la carretera.

12. **Acotamiento:** Son franjas comprendidas entre la orilla de la carpeta o de la superficie de rodamiento y de la orilla de la corona de una carretera, que sirve para prote-

ger al pavimento y además es una zona de estacionamiento de emergencia para los usuarios.

13. Talud de Corte: Es la superficie inclinada que queda respecto a la horizontal como consecuencia de la intervención humana en una obra de ingeniería.
14. Cuneta: Las cunetas son zanjas que se construyen en los tramos de corte a uno o ambos lados de la corona, contigua a los hombros, con el objeto de recibir en ellas el agua que escurre por la corona y los taludes del corte.
15. Sub-drenes: Son los elementos de drenaje que desalojan las aguas subterráneas a través de los taludes del corte.
16. Alcantarilla: Está formada por dos partes, el cañón y los muros de cabeza. El cañón forma el canal de la alcantarilla y es la parte esencial de la estructura. Los muros de cabeza sirven para evitar la erosión alrededor del barril, para guiar la corriente y para evitar que el terraplén invada al canal.
17. Bombeo: Es la pendiente que se da a la superficie de rodamiento para evitar la acumulación del agua sobre el camino.
18. Contra-Cuneta: Generalmente son zanjas de sección trapezoidal, que se excavan arriba de la línea de los cerros de un corte, para interceptar los escurrimientos superficiales del terreno natural.
19. Borina: Es la obra que se construye en las carreteras con el fin de darle mayor estabilidad a los taludes.
20. Bordillos: Son elementos, generalmente de concreto asfáltico, que se construyen sobre los acotamientos junto a -

- los hombros de los terraplenes, a fin de encauzar el agua que escurre por la corona y que de otro modo causaría erosiones en el talud del terraplén.
21. Señalamientos: Son tableros con símbolos o leyendas o ambas.
22. Hombros: Son los puntos que limitan al ancho de la corona.
23. Corona: Es la superficie del camino terminado que queda comprendida entre los hombros del camino, o sea, las aristas superiores de los taludes del terraplén y los interiores de las cunetas.
24. Ancho de Calzada: Es variable a lo largo del camino y depende de la localización de la sección en el alineamiento horizontal y excepcionalmente en la vertical. Normalmente el ancho de calzada se refiere al ancho en tangente del alineamiento horizontal.
25. Derecho de Vía: Es la faja que se requiere para la construcción, conservación, reconstrucción, ampliación, protección y en general, para el uso adecuado en esa vía de sus servicios auxiliares, su ancho será el requerido para satisfacer esas necesidades.
26. Eje del Camino: Es la línea imaginaria que divide el camino en toda su longitud.

Los elementos que integran el alineamiento horizontal son las tangentes, las curvas circulares y las curvas de transición. El alineamiento vertical es la proyección sobre un plano vertical de desarrollo del eje de la sub-corona.

ii) **Señalamiento:** Las señales son tableros fijados en --
postes o estructuras, con símbolos, leyendas o ambas cosas --
que tienen por objetivo prevenir a los conductores de vehícu --
los sobre la existencia de peligros, su naturaleza, la exis --
tencia de determinadas restricciones o prohibiciones que li --
miten sus movimientos sobre el camino y proporcionarles la --
información necesaria para facilitar su viaje.

Las señales, tomando en cuenta su función, se han clasi --
ficado en: preventivas, restrictivas e informativas.

Estas a su vez deben de cumplir con los requisitos fun --
damentales que se exigen a cualquier dispositivo para el con --
trol del tránsito. Se exigen la concurrencia de cinco requi --
sitos fundamentales:

1. Satisfacer una necesidad importante.
2. Llamar la atención.
3. Transmitir un mensaje claro.
4. Imponer respeto a los usuarios del camino.
5. Estar en el lugar apropiado a fin de dar tiempo para reaccionar.

2.2.3.2 Vehículo.

Las carreteras se deben proyectar de acuerdo a las ca --
racterísticas del vehículo que son los que van a circular --
por éstas. Existen algunos factores que complementan las ca --

TIPO DE VEHICULO		NUM. DE PIES	ESQUEMA'S		SIMBOLO	PORCENTAJE RESPECTO AL TOTAL DE CAMIONES	PORCENTAJE RESPECTO AL TOTAL DE CAMIONES
			PERFIL	PLANTA			
VEHICULOS LIGEROS	AUTOMOVILES	2			Ap		46
	CAMIONETAS	2			Ac		12
VEHICULOS PESADOS	AUTOBUSES	2			B		12
	CAMIONES	3			T2/31	13	100
		4			T2/32	7	
VEHICULOS ESPECIALES	CAMIONES Y/O REMOLQUES ESPECIALES	5			T3/32		42
		7			T2/31 R2		
OTRAS COMBINACIONES		3					
MAQUINARIA AGRICOLA			VARIABLE			VARIABLE	
BICICLETAS Y MOTOCICLETAS							
OTROS							

Fig. 2.4 Clasificación general de los vehículos.

características del proyecto y esto se debe a que el vehículo es manejado por el usuario, el cual modifica las características del vehículo.

Los vehículos por su uso específico se han clasificado en: vehículos ligeros, vehículos pesados y vehículos especiales.

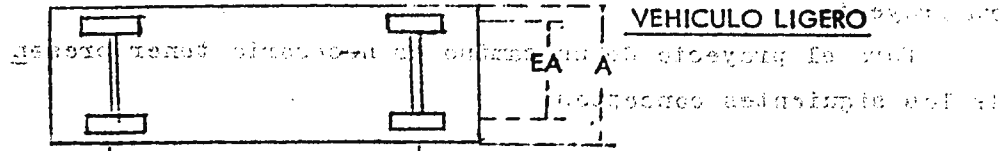
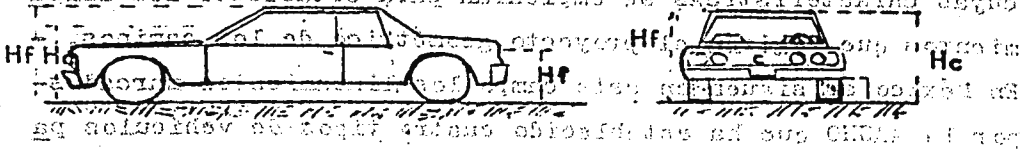
Los vehículos ligeros son vehículos de carga o de pasajeros de dos ejes y cuatro llantas. Los vehículos pesados son unidades destinadas al transporte de carga o de pasajeros con dos o más ejes y seis o más ruedas. Los vehículos especiales son aquellos que transitan eventualmente las carreteras. En la figura 2.4 se muestra la clasificación general de los vehículos.

1) Características geométricas y de operación: Las características geométricas de un camino están definidas por las dimensiones del vehículo.

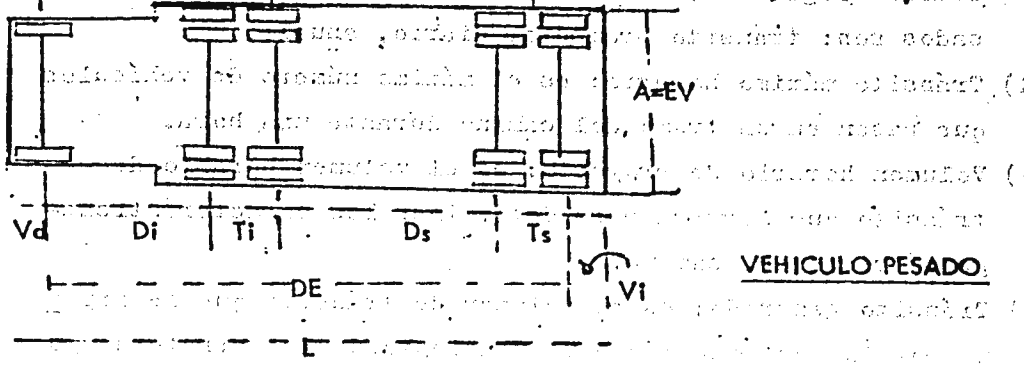
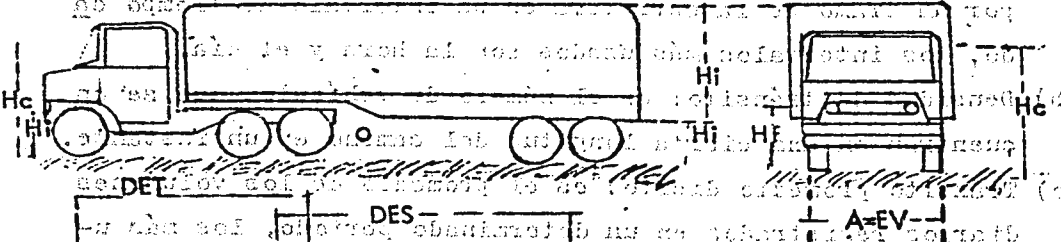
Las características de operación están definidas principalmente por la relación peso/potencia, lo cual en combinación con otras características del vehículo y conductor, determinan la capacidad de aceleración y desaceleración, y la estabilidad en las curvas y los costos de operación.

Dado que las carreteras deben proyectarse para un determinado tiempo de uso, las características geométricas deben tomarse en cuenta sabiendo que son factores cambiantes en el desarrollo de la industria automotriz, por lo que el proyecto debe ser capaz de dar seguridad a los nuevos vehículos que harán uso del camino (ver figura 2.5).

- especificación de vehículos con "alceamiento de suspensión" en el
 perfil de los vehículos para determinar los alcances de los ejes



- perfil de los vehículos con "alceamiento de suspensión" en el
 perfil de los vehículos para determinar los alcances de los ejes



DIMENSIONES DE LOS VEHICULOS LIGEROS Y PESADOS

Figura. 2.5

Los "vehículos de proyecto" son vehículos hipotéticos - cuyas características se emplearán para establecer los lineamientos que regirán el proyecto geométrico de los caminos. - En México se siguen en este campo los lineamientos marcados por la AASHO que ha establecido cuatro tipos de vehículos para proyecto.

Para el proyecto de un camino es necesario tener presente los siguientes conceptos:

- a) Volumen de tránsito: es el número de vehículos que pasan por un tramo de la carretera en un intervalo de tiempo dado, los intervalos más usados son la hora y el día.
- b) Densidad de tránsito: es el número de vehículos que se encuentran en una cierta longitud del camino en un instante.
- c) Tránsito promedio diario: es el promedio de los volúmenes diarios registrados en un determinado periodo, los más usados son: tránsito promedio, diario, anual.
- d) Tránsito máximo horario: es el máximo número de vehículos que pasan en un tramo del camino durante una hora.
- e) Volumen horario de proyecto: es el volumen horario de tránsito que servirá para determinar las características geométricas del camino.
- f) Tránsito generado: es el volumen de tránsito que se origina por la construcción o mejoramiento de la carretera y/o por el desarrollo de la zona por donde cruza.
- g) Tránsito desviado o inducido: es la parte del volumen de tránsito que circulaba antes por otra carretera y cambia su itinerario para pasar por la que construyen o se mejo-

ra.

Para conocer los volúmenes de tránsito en los diferen-

tes tramos de una carretera se utilizan como fuentes los da-

tos obtenidos de los estudios de origen y destino, los afo-

ros por muestreo y los aforos continuos en estaciones perma-

ntes.

ii) Composición y distribución del tránsito por sentido:

Para determinar las características geométricas de un proyec-
to carretero, es necesario analizar de acuerdo con el nivel
de servicio que se pretenda que debe proporcionar el camino,
durante el periodo de previsión, la composición y distribu-
ción del tránsito por sentidos.

La fluidez del tránsito depende, además del volumen de-
tránsito, del porcentaje relativo de vehículos con caracte-
rísticas diferentes y de su distribución por sentidos.

iii) Velocidad: La velocidad es un factor muy importante-

en todo proyecto y factor definitivo al calificar la calidad
del flujo de tránsito.

Su importancia como elemento básico para el proyecto --
queda establecida por ser un parámetro en el cálculo de la -
mayoría de los demás elementos del proyecto.

La velocidad del proyecto es la máxima velocidad a la -
cual los vehículos pueden circular con seguridad sobre un ca-
mino, cuando las condiciones atmosféricas y del tránsito son
favorables.

La selección de la velocidad de proyecto está influenciada principalmente por la configuración topográfica del terreno, el tipo de camino, los volúmenes de tránsito y el uso de la tierra.

iv) **Capacidad:** La capacidad de un camino o de un carril, es el número máximo de vehículos que pueden circular por él durante un periodo determinado y bajo condiciones prevale-

cientes, tanto del propio camino como de la operación del tránsito. Depende de varias condiciones: la composición del tránsito, los alineamientos horizontal y vertical, y el número y ancho de carriles. La capacidad de un camino se puede calcular con la fórmula donde hay elementos que restringen la circulación, tales como enlaces, entrecruzamientos o semáforos; la fórmula es:

$$c = 2\,000 \frac{N}{C} \frac{V}{W T C}$$

c = Capacidad (Número máximo de vehículos que circulan por hora en un tramo de carretera).
2 000 = Vehículos ligeros por carril.

N = Número de carriles (en un sentido).

V = Relación volumen-capacidad.

W = Factor de ajuste por ancho del carril y distancia a obstáculos laterales (factor que se observa de una tabla).

TC = Factor de ajuste a la capacidad por vehículos pesa-

dos.

.nerouhnoe les obioesox eb eqnoit (1

2.2.3.3 Usuario.

El usuario es el elemento crítico en la determinación de muchas características del tránsito, se requiere el conocimiento de las características físicas y psicológicas del usuario; existen condiciones del medio ambiente que afectan también al individuo y que es necesario conocerlas, como la tierra, su uso y actividad; el ambiente atmosférico; obras viales; la corriente del tránsito; etc. Estos efectos estimulan al ser humano, pero también existen otras causas en el interior de su organismo que lo afectan, como el alcohol, deficiencias físicas y aun problemas emocionales. La motivación, la inteligencia, el aprendizaje y el estado emocional son otros elementos profundamente significativos en la operación del tránsito.

Las características del usuario en las que se apoya un proyecto de un camino que constituyen puntos de interés fundamental son:

- a) Visión del conductor.
- b) Agudeza visual.
- c) Visión periférica.
- d) Visión en condiciones de deslumbramiento.
- e) Percepción del espacio.

f) Tiempo de reacción del conductor.

2.3 SISTEMA FERROVIARIO.

2.3.1 Generalidades.

El sistema ferroviario tiene sus orígenes por el año de 1808 en el que fue hecha la primera locomotora de vapor, la cual fue fabricada por Trevithock en Inglaterra. Esta primera locomotora alcanzó 15 millas por hora, siendo un asombro para la gente de esa época.

Para el año de 1825, Stephenson construye en Inglaterra la primera locomotora eficiente, y en 1825 se remolca un tren de 40 toneladas de peso que corre a 26 kph jalado por la locomotora "Rocket" tipo Stephenson, en el primer ferrocarril comercial cubriendo el trayecto de Liverpool a Manchester.

Las vías con rieles y durmientes se usaban desde 1670 en el transporte de carbón en las minas, también se dice que los Faraones usaron rieles en sus acarrees de grandes piedras labradas, pero el ferrocarril propiamente dicho nace en 1825.

Para 1849, las últimas máquinas de los Stephenson corrieron trenes a 93 kph de velocidad máxima con promedios de 80 kph en las mejores compañías de Francia e Inglaterra.

En 1850, las locomotoras Crampton de 800 Hp, alcanzaron velocidades de 125 kph. Para el año de 1865, en Estados Unidos, un tren con locomotora AMERICAN alcanza 165 kph; Bélgica aporta la distribución de vapor según el excelente tipo Walshaert; Mallet en Francia produce la Compound; y Baldwin en Estados Unidos fabrica American, Pacific y Santa Fe. Y docenas de tipos de locomotoras se desarrollan en todo el mundo bajo la tremenda expansión ferroviaria que produjo la primera revolución industrial mundial, acaecida entre 1825 y 1925, siglo de la máquina de vapor, que conforme ha transcurrido el tiempo han evolucionado hasta llegar a las máquinas eléctricas, las diesel eléctricas y las hidráulicas.

Se ha cambiado de la máquina de vapor que corría 15 millas por hora a una locomotora eléctrica B-B serie 700 que corre 331 kph.

En México, el ferrocarril se inicia en 1850 con la ruta México-Veracruz que se termina en 1866 después de la guerra contra la intervención de Maximiliano. En 1884 se terminó la vía central entre México y Ciudad Juárez, para 1905 la red asciende a 16 630 kilómetros.

En 1910, la construcción de las vías férreas es suspendida debido a la revolución. A partir de esa fecha la red básica crece en forma lenta, en 1926 llega a un total de 18 450 kms y con el crecimiento del país el sistema ferroviario crece también para llegar en 1964 a 23 500 kms.

2.3.2 Planeación.

El reconocimiento de que los recursos necesarios para las inversiones en obra y equipo ferroviario y en general para todo tipo de gastos como en creación y en ampliación del capital básico que permite promover y sostener la evolución armónica y acelerada de la sociedad en que vivimos, son muy superiores a los disponibles, hace evidente la necesidad de racionalizar su uso, de tal forma que sea posible obtener el máximo rendimiento de ellos, para el pronto logro de los objetivos.

Esto hace razonar sobre un análisis de las distintas alternativas de desarrollo del sector ferroviario; las técnicas de planeación y modelos resultan un valioso instrumento para planear este sistema.

Entre las bases principales en la elaboración de planes de inversión en obras de infraestructura y equipo ferroviario, destacan la fijación de objetivos y de lineamientos de política general para el sector, la preparación de un diagnóstico de la situación prevaiente, los pronósticos del tráfico por categorías y su distribución, y la proporción de mejoramientos y medidas a tomar para asegurar el movimiento del tráfico futuro y el equilibrio en el mercado de los transportes.

La actividad productiva y aspectos de la vida social, política, cultural y administrativa de un pueblo están ligadas de manera directa o indirecta con el traslado de personas y bienes de servicio, por lo que los objetivos de un plan de transportes en los que se inscriban los programas de inversiones en infraestructura y equipo ferroviario, deben

ir más allá de los problemas internos del propio sector y --
 -- formar parte inseparable de los planes de desarrollo económi-
co y social de la nación. Es por esas razones que los objeti-
vos de los planes de transporte no podrán ser diferentes de-
los de crecimiento económico, industrialización, descentrali-
zación de actividades, desarrollo regional, aprovechamiento-
de recursos existentes y creación y fortalecimiento de los po-
los de desarrollo.

Una tarea que es importante y sin la cual muchas veces --
 es estéril cualquier esfuerzo de planeación, es la de defi--
 -- nir una clara y precisa política de transportes, en la cual --
 de manera natural se apoyen los planes de transporte, los --
 programas de inversiones en infraestructura, las estrategias --
 para producción de equipos y refacciones, y los planes de a --
 provechamiento y uso de los energéticos.

Las metas específicas del sector, inscritas en el con--
 -- texto del logro de los objetivos nacionales y dentro del pa--
 -- pel que en el proceso de desenvolvimiento general los ferro--
 -- carriles deben desempeñar, pueden resumirse como sigue:

- a) Satisfacer las demandas de transporte de personas y bie--
 -- nes con mucha eficiencia y un costo tal que la vía férrea
 absorba la parte del tráfico que económicamente más con--
 -- viene a la nación, teniendo en cuenta las necesarias ----
 transformaciones que operarán en el sector transporte en--
 -- los próximos años y buscando en forma permanente el mejor
 uso de los recursos de toda índole que se manejen desta--
 -- cando los humanos, los energéticos, y los de inversión en

infraestructura y equipos.

- b) Tender a la mejor coordinación y complementación entre --
 los diferentes modos de transporte, de tal suerte que ca-
 da uno de ellos tome a su cargo el tráfico que le corres-
 ponde dentro de un deseable equilibrio en el mercado de --
 los transportes.
- c) Disminuir al máximo posible los costos totales de trans-
 porte de bienes y personas que, por su naturaleza y --
 distancia de recorrido, encuentran en el transporte ferro-
 viario el modo más indicado para su movilización y al mis-
 mo tiempo hacer posible que los precios por los servicios --
 sean tales que tienda al equilibrio financiero de las em-
 presas, aliviando la carga para el Estado, eliminando las --
 nocivas deformaciones que a la economía pueden ocasionar-
 los subsidios al transporte y proporcionando las ventajas,
 libertad y flexibilidad que la autosuficiencia da a las --
 administraciones ferroviarias.
- d) Extender los sistemas, ampliar y modernizar las instala-
 ciones, y diversificar los servicios y sus modalidades pa-
 ra contribuir en la mayor medida posible al alcance de --
 los objetivos nacionales ya mencionados y constituir jun-
 to con otros medios del Estado un instrumento eficaz para
 el fomento de las acciones del desarrollo y distribución-
 del ingreso.

Para lograr lo anterior es necesario tomar en cuenta --
 una serie de medidas optativas, tarifarias, de reformas a la
 administración y a la organización; buscar en forma permanen-

te la reducción de costos y la más alta productividad y eficiencia en todos los sentidos; así como la canalización de importantes recursos de inversión para mejoramiento y adquisición de todo tipo que en su conjunto permitan la coherencia y compatibilidad de los planteamientos mencionados.

Es importante que se levante un inventario de los medios disponibles que deberá cubrir no sólo el estado físico de las instalaciones y el material existente, sino de su grado de utilización y en general de la identificación de los problemas y obstáculos que impiden el mejoramiento en la calidad de los servicios y absorber la demanda que dentro del mercado de transportes le corresponde a la vía férrea, aun cuando cabe reconocer que en la mayor parte de nuestro país ya se cuenta con un sistema básico ferroviario bastante completo y que los inventarios de fuerza motriz y equipo de arrastre alcanzan cifras de consideración, lo que constituye un patrimonio del que debemos obtener el máximo rendimiento. Con estos datos debemos realizar un diagnóstico del estado actual del sistema, con lo cual estarán en nuestro conocimiento las zonas en donde la concentración regional hace del sistema un problema para satisfacer su objetivo, así como también nos da a conocer aquellas zonas en donde el índice de utilización del ferrocarril es muy bajo con lo cual causa un gran número de pérdidas por inmovilización. Otro aspecto que se presenta es la necesidad de expansión de los patios, terminales y talleres de mantenimiento del equipo el cual nos muestra la necesidad de adquirir nuevos carros de carga y coches de pasajeros para absorber el crecimiento y satisfa

cer las necesidades de demanda.

La planeación va desde planteamientos teóricos y conceptuales, hasta las fases prácticas y ejecutivas en las que — las técnicas de evaluación de proyectos son instrumentos valiosos, tanto para el análisis de alternativas, como para el establecimiento de prioridades, cuantificación de la medida en que se alcanzan los objetivos buscados y el cálculo del rendimiento del capital involucrado en cada una de las iniciativas.

2.3.3 Proyecto y su evaluación.

La evaluación del proyecto se puede efectuar por criterios financieros y económicos, la fluencia del factor tiempo, criterios económicos de rentabilidad, cálculo de costos, cálculo de beneficios económicos, selección de alternativas y año óptimo.

Los elementos básicos para el sistema ferroviario son: vía, vehículo y usuario.

2.3.3.1 Vía.

La superestructura de la vía férrea la forman esencialmente:

Los rieles (paralelos a una distancia entre sus costados interiores denominada escantillón), permite el tránsito del equipo cuyas ruedas se mantienen sobre la vía, gracias a las cejas con separación igual al escantillón más una pequeña holgura.

Los rieles requieren la máxima precisión para su alineado en planta y la nivelación del perfil longitudinal, así como adecuadas sobrelevaciones para poder permitir altas velocidades y confort a un tráfico que somete a los rieles a grandes esfuerzos que precisan de fijación sólida para mantenerlos sobre los durmientes amortiguando golpes y vibraciones.

Los durmientes, a su vez, deben transmitir sólo presiones máximas admisibles al balasto y anclar a la vía para impedir su desplazamiento lateral o el corrimiento longitudinal.

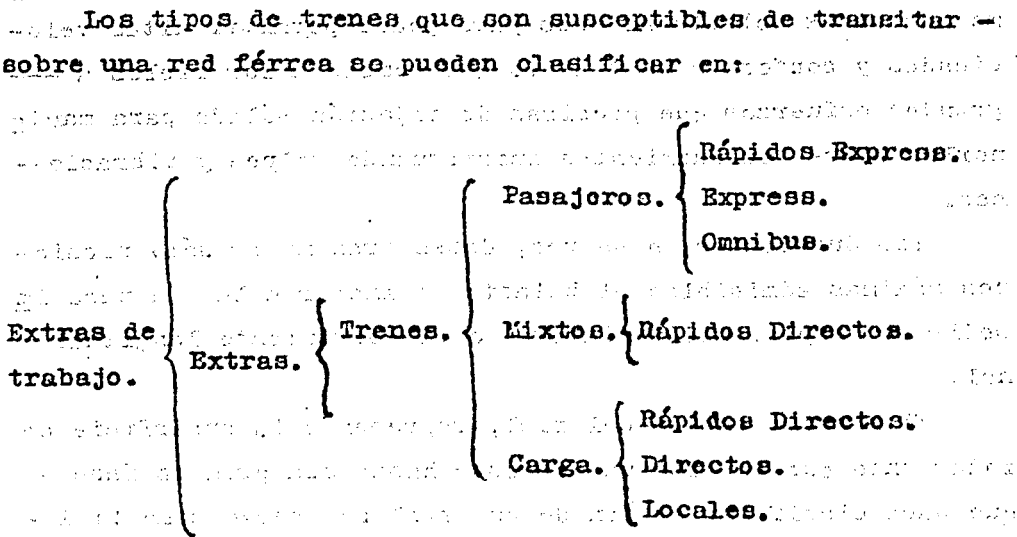
El hongo o cabeza del riel, representa la superficie de rodamiento que soporta un desgaste hasta una primera fase -- que hace clasificar el fin de ese riel seminuevo como riel usado, pero aprovechable en vías de menor importancia por largo plazo hasta alcanzar un desgaste del hongo y otros deterioros a un grado tal que obligan a retirar el riel usado de la circulación de trenes y venderlo como riel de recobro o chatarra para ser fundido nuevamente a un precio de salvamento.

Existen dos métodos para llevar a cabo el movimiento de trenes en la vía:

a) Correr trenes espaciándolos por tiempo.

b) Correr trenes espaciándolos por distancia.
2.3.3.2 Vehículo.

Los tipos de trenes que son susceptibles de transitar sobre una red férrea se pueden clasificar en:



El tren es utilizado para transportar carga entre 300 y 3 000 kilómetros o más.

Los carros y coches de ferrocarril tienen capacidad máxima denominada "de límite de carga comercial o neta" y un número de asientos para un máximo de pasajeros. El costo unitario mínimo se obtiene al utilizar 100% el tamaño del vehículo, lo cual es sólo obtenido durante las máximas demandas o picos de tráfico.

Esta situación se hace más compleja al considerar el re torno de los viajes que pueden variar desde regreso vacío, hasta regreso cargado en un determinado porcentaje.

El aprovechamiento de regreso vacío invita a levantar cualquier carga (a cualquier precio inferior al costo) lo cual no es permitido por tarifas oficiales vigentes.

Se puede clasificar el transporte según la urgencia de la entrega, el confort, la regulación de temperatura, etc. En ese orden, existe clase express, flote percedero (que requiere refrigeración y tren rápido), trenes de ganado, de pasajeros, tren pullman, y coches de primera o segunda, en trenes ordinarios o mixtos.

Los carros de ferrocarril o grandes trailers para 30 toneladas, tienen capacidad o volumen disponible que hace variar el peso comercial transportado según su densidad o sus limitaciones tales como el ganado.

La clasificación transportada por ferrocarril es notablemente distinta a la manejada por camiones, los cuales controlan tráfico de productos embotellados, una mayoría del transporte del ganado y las mercancías de alto valor y fácil manejo.

Los ferrocarriles disponen de equipo especial para cada trabajo. Carros tanque, cisternas, tanques para gas licuado, carros para refrescos y cervezas embotelladas, jaulas para ganado de dos pisos, carros para transporte de automóviles (9 a 15 carros), plataformas para equipos industriales extra pesados con capacidad hasta de 200 toneladas, carros caja para uso general, carros refrigeradores, góndolas para minera-

les con descarga lateral o para balasto con descarga de fondo, carros tolva, plataformas con redila y moderno lequiponde plataformas especiales para transportar trailers, forman el equipo de servicio público de carga además del equipo de pasajeros con coches de primera y de segunda clase. Asientos numerados reclinables "coach", carros comedor y observatorios, pullman, y nuevos carros dormitorios con cuartos privados y pasillo lateral forman un cuadro que se completa con el equipo de trabajo.

Los vehículos de carga producen tráfico comercial y su productividad depende de usar al máximo su capacidad de carga, reducir los viajes de vacío, aumentar recorridos, etc. La velocidad máxima instantánea y la media entre ciudades no es tan importante incrementarla en demasía, como la necesidad fundamental de reducir demoras en los patios y terminales, tiempos de carga, descarga, reparación, etc. Actualmente la velocidad promedio de los trenes en México es de 20 kph para tren carguero y 45 kph para tren de pasajeros.

Por otra parte existen varios tipos de locomotoras. Existen máquinas de vapor (émbolos y bielas), de turbina de vapor, diesel mecánica, diesel eléctricas, diesel hidráulicas, eléctricas y el futuro espera la relativamente fácil adaptación de la energía nuclear a potentes locomotoras turbo eléctricas.

2.3.3.3 Usuario.

El usuario en el sistema ferroviario es de dos tipos: pasajeros y carga. Los pasajeros forman una parte esencial de este concepto, pueden viajar en carácter de turista o de trabajo debido a la comodidad, economía y relativa rapidez que brinda el sistema. Existe una gran demanda en los dos casos.

La clasificación estadística divide la carga por su origen en productos inorgánicos, animales, agrícolas, manufacturados, etc. En tanto que las clasificaciones con objetivo tarifario consideran el peso volumétrico, la facilidad de carga y descarga, la duración y riesgos, etc.

2.3.4 Estación ferroviaria y operación del sistema.

La estación de pasajeros en este caso, es un conjunto de instalaciones que se construyen para proporcionar una forma adecuada al pasajero para salir de una ciudad, llegar a ella o pasar por ella.

De acuerdo con el reglamento de transporte en vigor de los ferrocarriles que operan actualmente en la República Mexicana, una estación es un lugar designado en el horario con determinado nombre y kilometraje. En dicho lugar el ferrocarril proporciona servicios de carga y descarga de pasaje.

Por otro lado, un patio es un sistema de vías dentro de límites definidos por medio de las placas respectivas, destinado a la formación de trenes, almacenamiento de carros u o-

tros fines y sobre las cuales pueden efectuarse movimientos no autorizados por el horario ni por órdenes de tren, pero sujetos a las señales y reglas prescriptivas o a instrucciones especiales. Los y algunos trabajos de la ciudad operan en las estaciones, patios y terminales de un sistema de transporte ferroviario, se planean y proyectan en función de las necesidades de operación de dicho sistema. Las necesidades antes mencionadas las podemos dividir en su forma más general en dos grupos: las correspondientes al movimiento de pasajeros y las que corresponden al movimiento de carga.

El equipo ferroviario permanece constante solamente en su gálibo, pero aumenta de continuo su longitud y su peso -- bruto, llegándose en la actualidad a carros plataformas de 90 pies de largo y coches de 65 pies, con pesos máximos de 90 ton en carros caja, de 83 ton en pullman y 60 ton en equipo normal de pasajeros.

Como se había mencionado anteriormente, los ferrocarriles pueden llevar a cabo su movimiento con dos métodos: espaciado por tiempo, o espaciado por distancia.

El despacho de trenes espaciados por tiempo, consiste en que dos trenes sucesivos que se desplazan en la misma dirección, conserven un intervalo de tiempo determinado (en México dicho plazo es de 10 minutos), al pasar sobre un mismo punto y, cuando se trata de dos trenes que se desplazan en sentido contrario (válido al mover los trenes sobre vía única), uno de ellos, el de menor derecho, deja la vía troncal-expedita, metiéndose a un lado de encuentros o quedándose en un patio cuando menos 10 minutos antes de que pasa por di

cho lugar el tren de mayor derecho.

El despacho de trenes por distancia, consiste en que dos trenes que se muevan en el mismo sentido y por una misma vía, conserven durante su recorrido una distancia mínima determinada de antemano; dicha distancia se determina tomando en consideración el número de trenes que se desplazan diariamente por cada distrito de operación, así como las velocidades asignadas a los mismos, trazo de la línea, etc.

La distancia que deben guardar dos trenes consecutivos se garantiza por medio de una señalización adecuada y el establecimiento de block, ya sea telefónico, manual o automático.

2.4 SISTEMA AEROPORTUARIO.

2.4.1 Generalidades.

En México, el sistema de transporte aéreo constituye un factor de desarrollo muy importante, puesto que ha cambiado radicalmente el concepto tradicional de la transportación de personas, mercancías y correspondencia, tanto por la velocidad de desplazamiento de los aviones y la capacidad de éstos, así como la comodidad y seguridad creciente de los servicios que proporcionan.

Este sistema, debido al gran desarrollo con que se le -

ha impulsado en nuestros días, puede a la postre ser un medio ideal para transportar grandes volúmenes de carga, ya que éste resulta el medio más eficaz para vencer las barreras impuestas por las largas distancias y los obstáculos que presenta la orografía.

En nuestro país se tienen referencias de los inicios de la aviación desde el día 18 de mayo de 1784 en que José María Alfaro elevó el primer globo sobre el territorio de la Nueva España y el 6 de febrero de 1785 Antonio María Fernández, en Tlaxcala, se convirtió en el primer mexicano que ascendió a bordo de un aerostato, a partir de estas fechas y conforme ha transcurrido el tiempo la aviación de nuestro país se ha desenvuelto teniendo como peldaños los estudios y descubrimientos de hombres que con su creatividad, empeño, constancia y en innumerables ocasiones su vida, han transformado el primitivo globo en majestuosos y rápidos aviones. Entre los creadores de nuestra aviación podemos hacer mención de algunos personajes que han dejado huella en el desarrollo de la aviación en México como: Guillermo Eugenio Robertzon, Joaquín de la Cantolla y Rico, Flora Conde, Ernesto Pigibet, Alberto Braniff, Juan Guillermo Villazana.

Los primeros grandes vuelos se iniciaron el 6 de julio de 1917, cuando se utilizó por primera vez un avión para transportar correspondencia entre Pachuca y la ciudad de México y con esto se desarrollaron los vuelos a grandes distancias, las cuales sólo se cubrían por ferrocarril. Y en el año de 1928 un aeroplano cruzó por primera vez una frontera mexicana.

Actualmente nuestro país cuenta con una red aeroportuaria que tiene comunicación con casi todo el mundo.

2.4.2. Planeación.

En el caso del transporte aéreo, cabe distinguir dos funciones distintas: la primera de integración constituida por pequeñas aeropistas que en muchos casos son sólo franjas de terreno medianamente acondicionadas para que puedan aterrizar en ellas algunos aviones muy pequeños y que, como su nombre lo indica, sirven para establecer un vínculo de integración a lugares inaccesibles en que existen pequeños núcleos humanos que requieren comunicación; y la segunda función propiamente de transporte que se da en aquellos lugares en que el desarrollo de las actividades económicas requiere de este servicio, ya sea por el ingreso de sus habitantes o para el desarrollo de sus actividades en cuyo caso se tiene desde pistas pequeñas acondicionadas, hasta aeropuertos con grandes instalaciones e importante movimiento de pasajeros.

Para la presencia del transporte aéreo se requiere la concurrencia de tres elementos: la aeronave, la terminal o puerto aéreo junto con la infraestructura de apoyo a la navegación aérea; y la demanda de dicho servicio, es decir, los pasajeros y la carga por transportar.

Un análisis prospectivo del desarrollo previsible de la demanda del transporte aéreo en el país, debe permitir deter

minar un Esquema Director a largo plazo, el cual constituirá la definición de las zonas o lugares del territorio nacional, para los cuales la demanda prevista hace necesario considerar la implementación del servicio aéreo, indicando, tanto como sea posible, la naturaleza y volumen de las necesidades correspondientes. La realización de estudios y análisis económicos y financieros de las alternativas de proyectos para satisfacer la demanda en las zonas o lugares definidos por el esquema, habrán de permitir conformar un plan de infraestructura aeroportuaria y, posteriormente, un programa de inversiones al introducir una prelación de proyectos y la asignación de recursos correspondientes, considerando en esta etapa las fórmulas de financiamiento adecuadas conforme a la magnitud y función de los proyectos. Por lo tanto, un esquema constituye la fase inicial de la planeación de la infraestructura aeroportuaria.

2.4.2.1 Análisis de la demanda de transporte aéreo.

El tráfico aéreo depende en gran medida de las condiciones demográficas y socioeconómicas, aunadas a la característica de la oferta de servicio. En tal virtud, el tráfico aéreo comercial no turístico, sólo puede ser económicamente factible en aquellas aglomeraciones urbanas de cierta importancia económica.

Como criterios para definir los sitios o zonas que se

...sujetarán a un análisis de demanda, pueden citarse los si-
- guientes: político-administrativo, económico (centros de pro-
- ducción y consumo), social (determinado tamaño de localida-
- des) y ordenación del territorio (polos de desarrollo). Es-
- tos criterios, además de definir los sitios o zonas, podrían
- establecer una primera visión de enlaces deseables dentro --
- del transporte aéreo.

El tráfico aéreo depende de las condiciones demográfi-
- cas y socioeconómicas de la población por servir; por consi-
- guiente, habrá que conocer tales condiciones, es decir, el -
- número de habitantes y su evolución y los niveles de ingreso
- de los mismos, tomando en cuenta el porcentaje de los econó-
- micamente activos para determinar los usuarios potenciales -
- del transporte aéreo.

Para determinar proyecciones, es indispensable analizar
- la composición y características del tráfico aéreo, para lo-
- cual puede efectuarse dos tipos de análisis en aeropuertos -
- en operación:

- a) Encuestas a los pasajeros: Motivaciones y características socioeconómicas, aspectos relativos al transporte terres- tre hacia y del aeropuerto.
- b) Estudios de origen y destino de los tráficos: Basados en- datos de las compañías aéreas.

Para el análisis se usan en nuestro país las siguientes fases:

- a) Modelo para determinar tráfico interurbano no turístico:--
 En este tipo de análisis se usa el modelo gravitacional el cual es comentado en el siguiente capítulo.
- b) Determinación del tráfico turístico interurbano: El tráfico turístico puede determinarse con base en la información resultante de la encuesta a los pasajeros. De hecho para este tráfico no se tiene una ley explicativa como la anterior en base a las poblaciones e ingresos, puesto que los coeficientes de atracción turística corresponden a otros valores, tales como la existencia de playas, atractivos arqueológicos, sitios históricos, servicios, etc.
- c) Ajuste de la evolución del tráfico interno en función del Producto Interno Bruto: Se analizan los factores relativos al ingreso o la evolución resultante de una difusión del transporte entre nuevos sectores de la población. Estos aspectos pueden tomarse en cuenta con la relación estadística entre el Producto Interno Bruto per capita y el tráfico aéreo comercial interno per capita en pasajeros por kilómetro. Lo anterior permitirá hacer cálculos relativos a las tasas de crecimiento promedio del tráfico aéreo comercial interno de pasajeros, por una parte, y en pasajero-kilómetro por hora. Además permite tener un análisis del tráfico a nivel del conjunto nacional, el cual a su vez permitirá revisar el total del tráfico turístico más el no turístico.

2.4.2.2 Análisis de la actividad aérea.

Otro aspecto que es necesario conocer dentro de los estudios para definir un esquema para la infraestructura aeroportuaria, es el relativo a las actividades aéreas, las cuales están divididas principalmente en dos clases:

- 1) **Aviación Comercial:** Constituida por todas las actividades del transporte público, por vuelos regulares o irregulares, efectuados por compañías oficialmente habilitadas.
- 2) **Aviación General:** Que incluye todas las operaciones no efectuadas por la categoría anterior, vuelos de escuelas, negocios, privados, etc.

Estas dos clases se subdividen a su vez en:

- 1) **Aviación Comercial:**
 - a) **Vuelos de corto alcance.**
 - b) **Vuelos de mediano alcance.**
 - c) **Vuelos de largo alcance.**
- 2) **Aviación General:**
 - a) **Aviación no sujeta a itinerarios fijos.**
 - b) **La aviación ligera constituida por los demás movimientos.**

La importancia de conocer esta clasificación y el número de movimientos en cada caso se traduce en la definición de áreas, tipo de servicios e instalaciones que demandará el aeropuerto en estudio.

2.4.2.3. Previsión Tecnológica.

El objeto de esta etapa para la definición de un esquema para la infraestructura aeroportuaria, lo constituye la definición del equipo crítico que deberá operar durante el plazo considerado para satisfacer adecuadamente la demanda, ya que el principal problema es la elección del sitio para el aeropuerto; es su adecuación a las exigencias de los equipos que lo servirán durante su vida útil, lo cual determinará las características de la infraestructura.

Podría pensarse que para definir los equipos a emplear, bastaría conocer las características en cuanto a capacidad de los aparatos que actualmente tengan en operación las aerolíneas probables a operar en el aeropuerto o aeropuertos en estudio; sin embargo es necesario tener presente que la vida útil del aeropuerto con estos equipos podrá cambiar en función de la aparición de nuevos tipos de aeronaves. Por tal motivo es necesario proceder a hacer un análisis de los avances tecnológicos que se contemplen en el corto plazo.

Dicho análisis deberá comprender previsiones generales en cuanto a equipos para vuelos de largo, mediano y corto alcance.

1) Determinación del equipo por emplear: La determinación del equipo por emplear es una relación dependiente, entre otros factores, de tres parámetros fundamentales:

a) La distancia de recorrido.

b) El volumen y tipo del tráfico considerado.

c) La frecuencia del servicio.

Cada avión está diseñado para llevar una carga a cierta distancia, y cuando aumenta la distancia más allá del valor límite, se reduce la carga que puede transportar por la necesidad de llevar más combustible. La operación del avión está entonces limitada a este valor límite por razones económicas y de seguridad.

El volumen del tráfico influye directamente en las características del avión que se emplea en una ruta. De manera evidente, el uso de un avión de mayor tamaño siempre resultará más económico cuando se tiene un coeficiente igual de ocupación.

La adopción de los tipos de aviones a los volúmenes de tránsito y a las distancias de recorrido se enfocará como sigue:

- a) Tráficos inferiores a 12 000 pasajeros/año.
- b) Tráfico de Nivel 1, 12 000 a 25 000 pasajeros/año.
- c) Tráfico de Nivel 2, 25 000 a 60 000 pasajeros/año.
- d) Tráfico de Nivel 3, 60 000 a 120 000 pasajeros/año.
- e) Tráfico de Nivel 4, 120 000 a 200 000 pasajeros/año.
- f) Tráfico de Nivel 5, más de 200 000 pasajeros/año.

ii) Determinación de la infraestructura necesaria: Este análisis tiene por objeto permitir la definición de las nece

sidades de infraestructura a mediano y largo plazo, sobre la base de que en un esquema sólo se determinará ciertos rasgos de dicha infraestructura.

Es necesario precisar que la determinación de dicha infraestructura depende del conocimiento de los servicios que van a ser requeridos, por lo que será determinante tener presente la estructura de la actividad aérea esperada, es decir, tener conocimiento de la magnitud de la aviación general, del transporte comercial externo, y del internacional de mediano y largo alcance.

2.4.3 Proyecto y evaluación económica de aeropuertos.

La evaluación económica de un aeropuerto proporciona un indicador que permite saber si la inversión es o no rentable desde el punto de vista económico. La forma de efectuar la evaluación puede llevarse a cabo de distintas maneras dependiendo del caso específico de que se trate. Mencionamos tres casos a continuación:

- a) Aeropuerto nuevo, en cuyo caso se comparan costos de recorrido por tierra con costos de recorrido y ahorros en tiempo por aire.
- b) Aeropuerto nuevo en un lugar en el que existe ya servicio aéreo, pero de menor calidad, en ese caso se comparan las condiciones actuales contra las futuras.

c) Aeropuerto nuevo en un lugar en el que ya exista servicio de jet; en este caso se comparan únicamente por efectos - del aumento de la demanda.

La evaluación económica en sí consta de los siguientes pasos:

- a) Proyección de pasajeros y operaciones.
- b) Cálculo de beneficios por ahorro de tiempo de los pasajeros y por costos de operación de las aeronaves.
- c) Obtención de los costos del proyecto.
- d) Cálculo del índice de rentabilidad.
- e) Cálculo de la tasa interna de rendimiento.

Como se indicó anteriormente los elementos que integran a un sistema de transporte son vía, vehículo y usuario.

2.4.3.1 Vía.

La vía de este sistema de transporte, la constituye el espacio y específicamente las rutas o aerovías (sección 2.4.4) que son caminos aéreos que conforman redes en el aire de manera semejante a las redes de comunicación entre varios puntos que las carreteras forman al ras del suelo.

2.4.3.2 Vehículo.

... que el aire, diseñada básicamente para transportar carga o pasajeros, trasladándose dentro de la masa de aire en forma autónoma. Los elementos básicos exteriores de un avión son:

Puede definirse el avión como una máquina más pesada — que el aire, diseñada básicamente para transportar carga o pasajeros, trasladándose dentro de la masa de aire en forma autónoma. Los elementos básicos exteriores de un avión son:

- a) La sustentación básicamente en las alas.
- b) El control con referencia a tres ejes en el espacio; longitudinal, transversal y vertical, y éste obtenido a través de los siguientes controles (ver figura 2.6): estabilizador horizontal, timón direccional, timón vertical, timón de profundidad, alerones o flaps.
- c) La propulsión, que son los motores (ver figura 2.7).
- d) La posibilidad de transportar carga o fuselaje, el cual presenta las siguientes características:

Estructura. { de armadura.
integral con el recubrimiento.
a prueba de falla.

Forma. { circular.
elíptica.
rectangular.
doble circular.

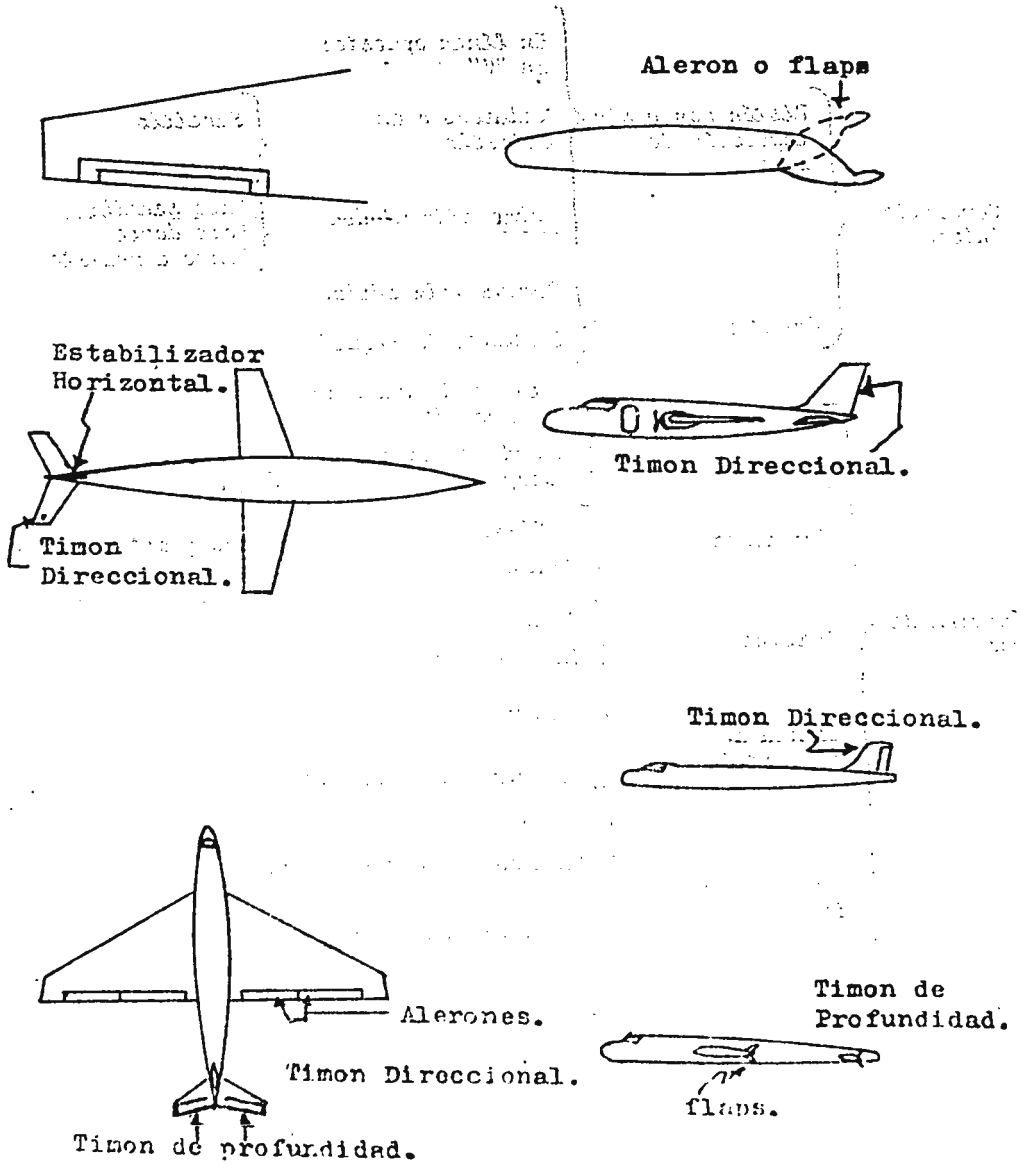


Figura. 2.6

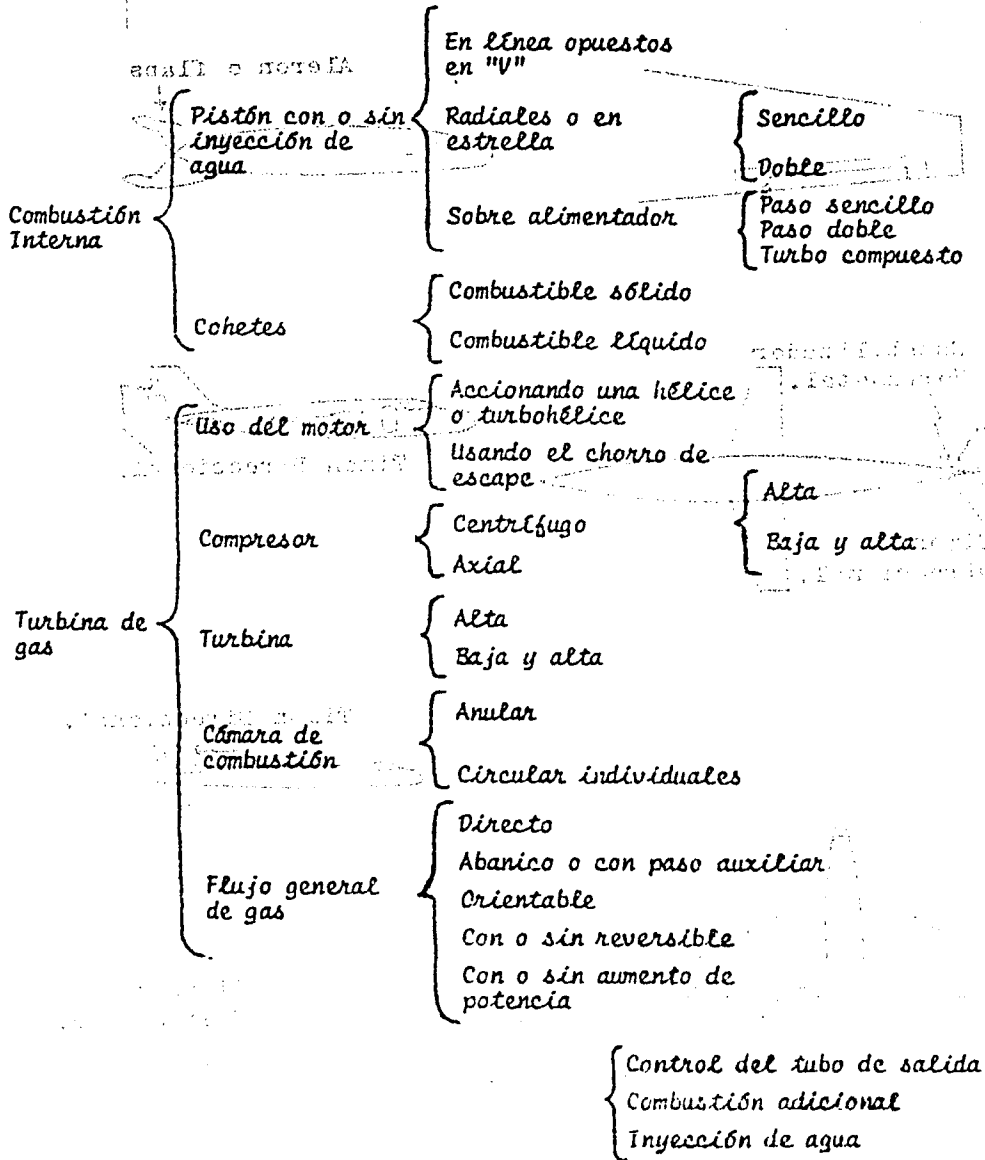


Figura. 2.7

- en sus lo **Parasol** de estructura en su estructura en
Posición de Alta. con una de estructura y diseño de estructura
las alas de media. un número de estructura y estructura de estructura
 - en su estructura de estructura de estructura de estructura de estructura
 - estructura de estructura de estructura de estructura de estructura de estructura

e) Soporte en tierra, que es el tren de aterrizaje, el cual puede ser de dos tipos generalmente: el tren convencional, el cual tiene una rueda o patín inferior en la cola; y el tren llamado triciclo, el cual tiene un sistema de una rueda en la parte frontal del avión llamado tren de proa o de nariz.

2.4.3.3 Usuario:

El usuario tiene características de importancia vital para la elaboración de un proyecto aeroportuario, estas características son:

- a) Volumen de pasajeros (diario, mensual, anual).
- b) Motivos del viaje (negocios, placer).
- c) Niveles de ingreso.
- d) Origen y destino.
- e) Tasa de crecimiento.

2.4.4 Aeropuertos.

Un aeropuerto es un conjunto de sistemas en el que se determina el diseño y proyecto de cada uno de ellos, para su buen funcionamiento y para que formen un conjunto correcto que permita el intercambio de personas y/o productos de los medios de transportación aérea con otro sistema de transporte que puede ser terrestre o marítimo.

Los sistemas que forman un aeropuerto son:

1) Espacios aéreos y su control: Durante los primeros años de la aviación no hubo problemas porque el tránsito era pequeño, pero con el paso del tiempo el número de aviones se incrementó y con ello se incrementaron los accidentes, por lo cual se hizo necesaria la reglamentación del espacio, con esto se fijaron límites en el espacio con el objeto de proteger a los aviones en vuelo.

Al espacio encerrado por estos límites, se le denomina "espacio aéreo". Actualmente este sistema está previsto de instrumentos que auxilian a la navegación de las aeronaves y que facilitan el control de su tránsito.

El espacio aéreo está compuesto por:

- a) **Rutas o Aerovías**: Son corredores perfectamente definidos en el espacio, establecidos para unir puntos geográficos importantes, tienen un ancho y un alto variable, con la limitación de que la altura mínima debe estar a 500 pies arriba del obstáculo más alto en la ruta.
- b) **Patrones de Espera**: Son áreas próximas a los aeropuertos cuya finalidad es la de mantener a los aviones en vuelo -

dentro de una zona segura en espera de su turno para aterrizar.

c) Zonas de Aproximación y Despegue: La trayectoria de despegue se divide en varias etapas que prevén la falla de uno de los motores del avión. La primera etapa conocida como primer segmento, está comprendida entre el punto donde el avión alcanza 10.5 m de altura y el punto en que se metió el tren de aterrizaje. La segunda etapa (segundo segmento) principia donde termina el primer segmento y finaliza cuando el avión alcanza 122 m de altura. Las últimas dos etapas conocidas como tercer segmento y segmento final están separadas por el punto en que los flaps son retraídos, suelen identificarse como una sola etapa llamada segmento de transición el cual termina a los 457 m de altitud.

Por otra parte, la solución a los problemas de control de tránsito en el espacio aéreo, radica en ubicar los aviones en el tiempo y el espacio, por lo que hay varios tipos de control que existirán de acuerdo con la categoría y ubicación del aeropuerto.

Estos controles son:

1. Control de Area.

2. Control de Aproximación.

} control de velocidad.
control de espera.

3. Control de Tierra. } control aéreo.
} control terrestre.

11) Pistas: Las pistas de aeropuertos son áreas rectangulares, alargadas, libres de obstáculos, cuya longitud, ancho, rugosidad y resistencia son adecuadas para permitir el aterrizaje y despegue seguro de diversos tipos de aviones bajo diferentes condiciones de tiempo y pilotaje.

Las características fundamentales son las siguientes:

1. Longitud: Los aeropuertos se clasifican según la OACI en función de la longitud de sus pistas en:

CATEGORIA	LONGITUD DE PISTA (M)
A	$L > 2100$
B	$1500 < L < 2100$
C	$900 < L < 1500$
D	$750 < L < 900$
E	$600 < L < 750$

La longitud de pista se calcula para despegue y se revisa para aterrizaje. Se suelen utilizar los conceptos "cabecera" y "umbral" de la pista como sinónimos; sin embargo, en algunos casos ambos puntos son diferentes. Cabecera es el lugar donde principia el pavimento de la pista. Y umbral es el punto donde al aterrizar el avión pasa a una altura determinada.

2. **Ancho:** El ancho de una pista está integrado por el ancho del pavimento, los acotamientos adyacentes y las franjas de seguridad.
3. **Acotamientos:** A lo largo de la pista, en las zonas adyacentes al pavimento, se construyen acotamientos formados por el suelo con una compactación tal que si un avión, por alguna razón se sale de la pista, aquél pueda soportar el peso de tal aeronave sin causarle daños estructurales.
4. **Franjas de seguridad:** El área de seguridad es una zona que encierra al pavimento de la pista y a los acotamientos, proporcionando además franjas de terreno libres después de los acotamientos y las cabeceras.
5. **Pendientes Longitudinales:** La pista a lo largo de su eje longitudinal, es de desearse sea horizontal, pero como esto presenta mucha dificultad se establecen ciertas especificaciones dependiendo del tipo de aeropuerto.
6. **Drenaje:** En cualquier estructura destinada al transporte es importante disponer de instalaciones adecuadas para drenar eficazmente el agua que se acumula en ellas; estas instalaciones se diseñan para desalojar el agua en un tiempo determinado, el cual fluctúa dentro de un rango prefijado. Este tiempo, en el caso de pistas, se reduce debido a los daños graves que puedan ocasionar el exceso de agua en las pistas.
7. **Orientación e identificación:** No se debe diseñar una pista sin tomar en cuenta la dirección e intensidad de los vientos.

A las pistas se les identifica con un número formado por dos dígitos de acuerdo a su orientación y obtenido de la siguiente manera: se observa el azimut de la dirección de seada al que se le elimina la fracción del grado, se le a proxima a los 10° próximos y se elimina el último cero; cuando el azimut es menor de 100° , este cero es transferido al primer término; cuando se tienen dos pistas paralelas, el número de identificación va seguido de la letra "I" o "D" según sea izquierda o derecha, respectivamente.

8. Configuración: La pista debe estar estructurada de tal forma que proporcione separación suficiente en el patrón de tránsito aéreo; cause un mínimo de interferencia y demoras en las operaciones de aterrizaje, despegue y rodaje; y proporcione la distancia más corta posible entre el edificio terminal y los extremos de las pistas.

9. Gotas: Son ensanchamientos de las cabezas de pistas, en los aeropuertos de tráfico inferior a 10 operaciones.

iii) Calles de rodaje: La principal función de las calles de rodaje es la de conectar a las pistas con el edificio terminal y las zonas de servicio y mantenimiento de las aeronaves. Las calles de rodaje se clasifican en: calles de rodaje de entrada y calles de rodaje de salida.

La localización de los rodajes de salida depende primordialmente de:

a) El tipo predominante de aviones que usa la pista.

- b) La velocidad de aproximación y de toque de ruedas.
 c) La velocidad de salida.
 d) El número de salidas.
 e) De la desaceleración, que a su vez depende de las condiciones de la superficie.

Por otro lado, la sección transversal de una calle de rodaje es similar a la de una pista; así pues, está formada por el ancho del pavimento, los acotamientos adyacentes y la franja de seguridad.

iv) Plataforma: La plataforma es un área especialmente dispuesta para las maniobras de acceso del avión y abandono del mismo por los pasajeros, carga y descarga de equipajes, correo en general, limpieza y servicio al avión. Deberán tener el tamaño suficiente para permitir las maniobras. Debido a la mutua dependencia existente entre la plataforma y el edificio terminal, es comprensible que sus formas estén influenciadas.

v) Edificio terminal: El edificio terminal de un aeropuerto se ha desarrollado como una respuesta a las crecientes necesidades de una sociedad dinámica con el continuo incremento de pasajeros. El edificio terminal tiene que ser un sistema que evolucione con el tiempo.

Los edificios se pueden clasificar de acuerdo con la forma en que se proporcionan los servicios en:

1. **Centralizados:** Todos los servicios se encuentran en un edificio, servicios para vuelos nacionales, internacionales, y servicios públicos.
2. **Descentralizados:** Existen clasificaciones de compañías y de servicios en edificios totalmente independientes.

Los tipos de configuraciones básicas que pueden tomar en cuenta para un edificio con relación a la plataforma son: lineal, dedos, satélites, y salas móviles.

Un aeropuerto puede estar formado por una o por combinaciones de ellas. Las principales zonas del edificio terminal son:

- a) Andenes de llegada.
- b) Vestíbulo.
- c) Zona de manejo de equipaje.
- d) Zona de manejo de carga.
- e) Oficinas para las líneas aéreas.
- f) Oficinas para dependencias gubernamentales.
- g) Oficinas para la administración del aeropuerto.

vi) Estacionamiento y vías de acceso: Tomando siempre en consideración el hecho de que lo que este sistema de transporte vende es velocidad, reducción de tiempo de viaje en comparación con otros medios de comunicación; el sistema de estacionamientos y vías de acceso deberá también ser concebido para cumplir con dicho objetivo.

vii) Ayudas a la navegación: Un vuelo en un momento determinado se efectúa bajo una de las dos técnicas siguientes:

1. VFR (reglas de vuelo visual), cada vez que el piloto se encuentre en condiciones de vuelo visual.

2. IFR (reglas de vuelo por instrumentos), cuando el piloto se encuentre en condiciones de vuelo por instrumentos.

Ya sea en condiciones VFR o IFR, es necesario contar con ciertas ayudas que pueden ser:

a) Ayudas visuales. Estas ayudas pueden estudiarse agrupando

las como sigue: indicadores, señalamientos, iluminación y letreros.

b) Ayudas electrónicas. Las más usadas son:

ADF (Automatic Direction Finder).

NDB (Non Directional Beacons).

VOR (Very High Frequency Omni-Range).

DME (Distance Measuring Equipment).

c) Radar. Existen diferentes tipos de radar, que se clasifican en dos grupos: radares meteorológicos y radares de control de tránsito.

Los más comunes son:

ASR (Airport Surveillance Radar).

PAR (Precision Approach Radar).

GCA (Ground Control Approach).

ILS (Instrument Landing System).

viii) Instalaciones complementarias: Son todas aquellas -- instalaciones que se requieren para el buen funcionamiento del aeropuerto y para el servicio de los aviones como son: -- casa de máquinas, subestación eléctrica, hangares, dotación de agua, equipo contra incendios y rescates en los aviones, -- servicio de almacenamiento y distribución de combustible, comisariato, eliminación de basura, drenaje, etc.

ix) Abastecimiento de combustible: Dos características -- determinan este concepto: forma en que llega el combustible al aeropuerto y forma de abastecimiento a los aviones. En -- cuanto a la forma en que el aeropuerto es abastecido, se pueden distinguir principalmente tres formas: por carros tanque, por ferrocarril y por ductos.

Para el abastecimiento de combustible a los aviones en los aeropuertos pueden ser empleados los siguientes métodos: camiones cisterna, fosos bajo plataformas, y sistemas hidrantes.

2.5 SISTEMA PORTUARIO.

2.5.1 Generalidades.

La historia de la navegación se puede dividir en tres -- grandes etapas:

1. Período de la navegación sin brújula.
2. Navegación con brújula.
3. Navegación a propulsión mecánica.

Aunque en lo referente a la estructura y armamento haya una enorme diferencia desde los primeros barcos históricos y las goletas del siglo XVIII, los progresos técnicos de la navegación en los dos primeros periodos fueron esencialmente lentos y escasos. En el curso de aquellos largos siglos la embarcación se hizo más sólida, más cómoda y más rápida; pero hasta que la invención de la brújula y su difusión aportaron una preciosa e insustituible contribución a la seguridad, no pudo afirmarse que navegar no era un acto audaz, si bien seguía constituyendo una aventura.

El tercer periodo es, con mucho, el más importante. Es más, constituyó incluso un hecho revolucionario para la navegación. Desde los primeros decenios del siglo XIX a los primeros del siglo XX, un cambio profundo y orgánico transformó la técnica marinera. Desde los primeros y tímidos experimentos con máquinas de vapor en el Sena a los potentes trasatlánticos, no median más de cien años.

En este intervalo todo ha cambiado: método de propulsión, estructura del casco, y técnica de navegación. Pero este nuevo e imprevisto giro de la navegación no acaba en sí mismo; arrastra y transforma toda la vida de la humanidad.

La regularidad y el menor costo de los transportes, el aumento progresivo de la velocidad y de la seguridad anulan barreras consideradas infranqueables hasta entonces. Trigo, -

arroz, azúcar, carbón, hierro, carnes, etc. pasan en pocos días de un continente a otro. Ningún lugar de la tierra es inalcanzable. La comodidad y la economía de los precios son los nuevos reclamos que inducen a viajar por mar a un número de gentes cada vez mayor.

2.5.2 Planeación.

En la planeación del sistema portuario es necesario establecer cual será el probable comportamiento de la economía del país durante los 20 años siguientes y cuales las demandas que el comercio marítimo impondrá al sistema portuario. Además es necesario un análisis del enlace de los transportes terrestres y marítimos para estimar cuales serán los costos a que estará sujeta la carga marítima en su movimiento desde cualquier origen hasta cualquier destino. Cuando estos parámetros se hayan definido, se examinarán los niveles económicos con que funciona actualmente el sistema de puertos y el que resultará al introducir las mejoras en él.

Para el análisis citado se usan modelos matemáticos de asignación de tráfico que permiten ensayar cualquier alternativa de ampliación de capacidad, mecanización del manejo de la carga, cambio de tecnología, etc.; y evaluar las inversiones requeridas y el beneficio económico que ellas producen (estos modelos se comentarán en el capítulo siguiente).

El estudio de planeación se efectúa realizando el análisis

...del sistema y contempla los aspectos tratados a continua
ción.

2.5.2.1 Las necesidades del comercio marítimo.

El grado de desarrollo que ha alcanzado la economía, el potencial de sus recursos y las perspectivas de avance que hoy se vislumbran, sirven de base en el análisis para esta e tapa. Se analizan los recursos humanos y naturales del país, para definir los excedentes explotables que el país estará en capacidad de producir y los insumos importados que México requerirá para sostener el nivel económico, limitado el estudio a aquellos productos que vendrían a constituir el comercio por vía marítima, con lo cual se podrá identificar: centros de producción y consumo, ubicación en ultramar de los principales mercados para los productos, y origen de las importaciones y proyecciones de la magnitud del tráfico para cada tipo de mercancía involucrada. Estas proyecciones cuantifican la demanda que el sistema portuario debe satisfacer durante el periodo analizado.

2.5.2.2 Los costos del transporte.

En esta fase del estudio se analizan los sistemas de --

transporte y se establecen sus costos económicos. Fundamentalmente, se deben cuantificar los parámetros de costo variable para cada tipo de transporte y para cada tramo de recorrido, en tal forma que sea posible calcular el costo de distribución en cada mercancía desde su origen hasta su destino final, cualquiera que sea la ruta que se le asigne. Tres elementos de costo se analizan en el estudio:

a) Costo del transporte terrestre.

b) Costo del servicio portuario.

c) Costo del transporte marítimo entre puertos mexicanos y orígenes de ultramar.

En el campo de la operación portuaria y el transporte marítimo, la tecnología ha producido mundialmente cambios tan substanciales en los costos de manejo y transporte de carga, que es necesario prever que estos cambios tengan aplicación en el sistema mexicano. Por lo tanto, el análisis debe tomar en consideración la operación actual y la operación que podría obtener al mejorar los puertos, lo cual se podrá obtener mecanizando ciertas operaciones, utilizando nuevos sistemas de conterización y empleando buques de mayor porte.

2.5.2.3 Asignación de tráfico y estudio de alternativas.

La máxima eficiencia de un sistema total de transporte-

se obtiene idealmente cuando las cargas fluyen a través de la red, utilizando los vehículos y recorridos que hagan mínimo su costo de distribución total. Para llegar a esta etapa se utilizan modelos matemáticos de asignación de tráfico. Los aspectos que se analizan en esta etapa del estudio son: volumen, origen y destino de importaciones y exportaciones y costo del transporte.

Con esta información, el modelo sintetiza la distribución de cargas que hará óptima la utilización del sistema, asigna el tráfico correspondiente a cada puerto y calcula el costo total de distribución que producirá tal asignación. Mediante este instrumento ha sido posible analizar el valor relativo de cualquier alternativa de mejoramiento del sistema portuario a través del siguiente procedimiento:

- a) Alternativa de referencia: Se puede suponer que el sistema portuario continuaría operando en la forma actual sin introducir cambios tecnológicos o de productividad que modifiquen su estructura de costo.
- b) Operación mejorada: Si se examinan los tráficos asignados a cada puerto en el proceso anterior, es posible identificar ciertos proyectos tales como instalaciones mecanizadas para graneles, profundización de algunos puertos para admitir buques de mayor calado, instalaciones de contenedores para el manejo de carga general, etc., además que al mismo tiempo que amplían la capacidad del sistema, abaratan los costos de transporte al permitir una mayor eficiencia. Estas nuevas condiciones se introducen al modelo,

el que nuevamente asigna los tráficos o calcula un nuevo costo de distribución.

c) Creación de un plan: A través del juego de alternativas citadas, el sistema de transporte se hace cada vez más eficiente a medida que se van introduciendo mejoras en los puertos hasta llegar al punto en que inversiones adicionales no producen una nueva reducción en los costes totales del transporte. Se considera entonces que se ha alcanzado el máximo rendimiento con lo cual irán descritos todos los pasos a seguir en la planeación del sistema portuario.

2.5.3 Proyecto.

Como en los sistemas anteriores el proyecto del sistema marítimo requiere del conocimiento de los tres elementos fundamentales que son: vía, vehículo y usuario.

2.5.3.1 Vía.

La vía es, en este caso, los océanos, lagunas y ríos. El conjunto de océanos cubre las tres cuartas partes de la superficie de la tierra y pese a que están intercomunicados, constituyendo una masa líquida continua, las rutas que los barcos siguen están bien definidas tanto por factores de ca-

rácter económico como por otros físicos que son las corrientes marítimas, los vientos, la niebla y la frecuencia de hielos flotantes; y también por la condición de los puertos y la maquinaria que dispongan para facilitar las maniobras de carga y descarga.

2.5.3.2 Vehículo.

El vehículo del sistema portuario son las embarcaciones, pueden ser desde simples lanchas hasta lujosos trasatlánticos. El vehículo se forma por un casco dividido en compartimientos donde se lleva carga, maquinaria, pasajeros y equipo (ver figura 2.8).

Los tipos de embarcaciones son:

- a) Marítimas: barcos de motor diesel o vapor, barcos costeros, trasatlánticos, remolcadores, y barcos de gran calado.
- b) Lacustres: barcos de poco calado que generalmente son remolcadores y lanchones.
- c) Fluviales: barcos de gran calado.

Todas las embarcaciones requieren una serie de instalaciones y áreas de maniobras para poder realizar el ascenso y descenso de carga y pasajeros. A estas instalaciones se les llama puerto.

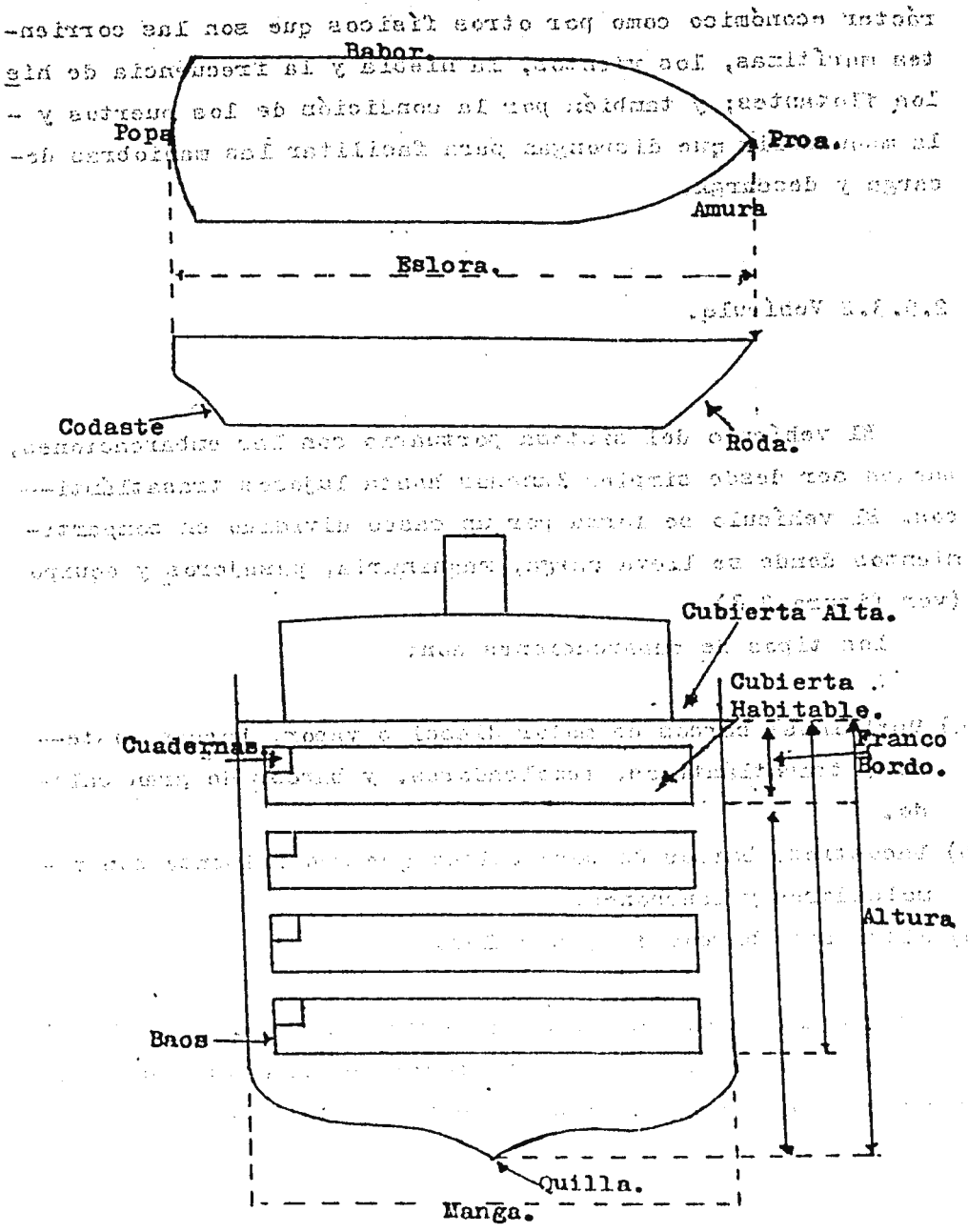


Figura. 2.8

Los puertos de gran movimiento están localizados no sólo en función de sus buenas condiciones naturales o de equipo para maniobras, sino también como consecuencia de disponer de una zona de influencia de gran actividad económica (Hinterland).

En algunas zonas del mundo se presentan una sucesión de puertos muy próximos, a estas zonas se les llama frentes marítimos y en ellos además de existir puertos, hay también zonas de fabricación de barcos y, por lo tanto de reparación y conservación de los mismos.

En cuanto a los ríos y lagunas, fue ahí donde el hombre primitivo inició el transporte que primero aprovechó las corrientes fluviales para el remolcado de las embarcaciones. En nuestros días, los ríos ayudan al transporte para poder llevar la carga dentro de la zona de consumo.

Existen ríos con capacidad natural para proporcionar una vía segura y rápida, y con el avance de la ingeniería el hombre ha podido transformar algunos ríos en verdaderas vías de circulación marítima aun cuando estas en forma natural no cumplen con las características mínimas para hacer posible la navegación.

2.5.3.3 Usuario.

En este sistema, el usuario está compuesto por carga y pasajeros.

La carga está compuesta por productos que van desde materia prima como minerales, petróleo, granos, etc., hasta productos manufacturados como maquinaria, alimentos envasados, telas, etc.

Los pasajeros son, en forma general, de tipo turístico y de negocios.

2.5.4 Puertos.

Los puertos deben cumplir con características como: zona de aguas tranquilas, canales de acceso y protecciones adecuadas.

Para el diseño de los elementos de un puerto se usa el barco de diseño que es un 90% mayor de todas las embarcaciones que hacen uso de las instalaciones. En nuestro país los puertos se han clasificado tomando en cuenta diferentes factores, así tenemos las siguientes clasificaciones:

- a) Por su ubicación.
- b) Marítimos.
- c) Fluviales.
- d) Lacustres.

1) Elementos básicos que integran a un puerto:

1. Elementos de protección: estos elementos pueden ser rompe

olas, escolleras o diques y espigones. Su principal función es crear una zona de aguas tranquilas en donde las embarcaciones estén seguras en caso de tener que esperar un determinado lapso de tiempo, para usar las instalaciones del puerto y cuando estén realizando las maniobras de entrada y salida del puerto; a esta área se le llama también antepuerto.

2. Lugares y medios de fijación de los barcos: el fondeadero es el área de agua del antepuerto donde el barco espera a un lado ya sea para usar el puerto o espera que pase el mal tiempo para salir.

Se debe cumplir una determinada extensión, abrigo, fácil acceso y fondo.

El tamaño de las dársenas está supeditado por el número de barcos.

La dársena de ciaboga, es el área donde el barco se pone en posición para entrar a las instalaciones de carga y descarga; se pueden efectuar maniobras con los propios medios del barco.

La dársena de operación, es el área contigua a los muelles preparados con una cierta profundidad para que se estacionen los barcos; esta profundidad tiene como objetivos: permitir que las embarcaciones entren y salgan con carga máxima, evitar la espera de los barcos durante la marea baja, reducir las averías de los barcos y fomentar el tráfico.

Las estructuras de atraque son básicamente los muelles,

cuya función es la de facilitar la comunicación entre el transporte naval y el terrestre, estos se localizan en las riveras de las costas o los ríos.

Los muelles pueden ser:

- a) Marginales o paralelas a la costa.
- b) Normales a la costa o en espigón.
- c) Con pasarela.

Los muelles pueden ser de pilotes, de muros de gravedad o de tabla-estacas. Se clasifican en cuanto a su función en:

- a) Muelles Graneros o de Cereales.
- b) Muelles de Minerales.
- c) Muelles Petroleros.
- d) Muelles Pesqueros.
- e) Muelles de Pasajeros.
- f) Muelles Deportivos.
- g) Muelles de Carga General.

Los factores que intervienen en las dimensiones de los muelles son: la intensidad del tráfico, el tipo de embarcación, el rendimiento del personal que trabaja en el muelle, y la eficiencia del equipo.

El muelle requiere de elementos de protección contra los impactos así como elementos de fijación.

Las obras de defensa pueden ser: fijas, colgantes, con pilotes, de gravedad u otro tipo.

Los elementos de fijación son principalmente: cornamusas, bitas y argollenas.

Existen también estructuras de atraque fuera de las instalaciones del puerto y estos son boyas.

ii) Señalamientos: El señalamiento marítimo puede ser:

a) Señales diurnas de visual directa

(boyas, balizas, mojeneras).

b) Señales nocturnas de visual directa

(faros, cohetes, campanas).

c) Señales (radar).

d) Señales de situación (barcos, faros).

Per su situación respecto al mar los faros pueden ser:

a) De tierra firme.

b) De isla pequeña.

c) En bajos fondos o escolleras.

d) Barcos faros.

iii) Medios de suspensión: Los medios de suspensión son aquellos elementos que son utilizados en la elevación y translación de la mercancía en el puerto.

Las maniobras que se realizan en el puerto con el barco son: estiba, alijo, chequeo, almacenaje y traslado.

El equipo de maniobra se puede clasificar en dos grupos:

1) **Equipo de maniobras en el muelle:**

- a) Equipo de mano.
- b) Estibadores de orquilla.
- c) Plataformas de madera.
- d) Carros remolque (desde 2 ton a 4 ton).
- e) Tractores.
- f) Transportadores (bandas, rodillos, placas, etc.).

2) **Equipo para maniobras de alijo:**

- a) Grúas (pórtico, vía de oruga, grúa viajera, grúa flotante).
- b) Plataformas de izado.
- c) Mallas.
- d) Mástiles de carga.

iv) **Elementos de custodia y almacenamiento:** Estos elementos constituyen principalmente:

- a) Bodegas de Tránsito: son lugares donde la carga se guarda por poco tiempo para posteriormente pasar a los almacenes de depósito.
- b) Almacenes: pueden ser de refrigeración, para productos inflamables, para algodón, para carga valiosa, para carga negra, granos, maquinaria, etc.
- c) Tanques: son utilizados para el almacenamiento del combustible que es utilizado en el puerto, para almacenar azu--

fragüidos, etc. cuando no está sujeta a clasificación al
 al momento de los asistencia así no hay en, aserías del de de
 v) Instalaciones complementarias: Se requieren instala-
 ciones para construcción y conservación de las embarcaciones
 (astilleros). Los astilleros comprenden una amplia zona con
 una serie de servicios que hacen posible la construcción o -
 reparación de las embarcaciones. Los astilleros deben contar
 con: oficinas, talleres, muelles, almacenes, bodegas y gra-
 das.

Lo que hace diferente a un astillero de otro es la gra-
 da, que es el lugar donde descansa el barco para que se le -
 efectue un servicio. Esta puede ser:

- a) Grada de madera para barcos pequeños.
- b) Gradas de reparación.
- c) Gradas de construcción, con la cuna formada por rie-
 les.
- d) Diques flotantes.

Se requieren también instalaciones para suministro de e-
 nergía eléctrica, drenaje, abastecimiento de agua, servicio-
 telefónico, oficinas de sanidad, aduana, gobernación, etc.

2.6 SISTEMA URBANO.

2.6.1 Generalidades.

La planificación urbana data en nuestro país de la época de los aztecas, ya que en las crónicas del historiador Manuel Toussaint se cuenta que los artífices indígenas que trazaron la ciudad de Tenochtitlan se revelan no sólo como peritos urbanistas, sino dotados de gran sentido del arte.

El núcleo del trazo estaba constituido por el recinto amurallado del gran Teocalli. A manera de ejes, cuatro importantes calzadas desembocaban en el centro. Es decir, que desde lejos, cualquiera que fuese el camino que se siguiera, se veía la enorme mole del gran templo.

Con la conquista quedó la ciudad destrozada y Hernán Cortés encomendó al "alarife" con ayuda de 50 000 indígenas el trazo de la nueva ciudad sobre el trazo original de los urbanistas aztecas, fue relativamente fácil al urbanista aplicar el trazo en demeró, o de cuadrícula, respetando el núcleo central como Plaza Mayor y las principales calzadas y acequias como base del sistema vial.

El trazo de la ciudad de México no presentaba ningún problema puesto que no existía ningún vehículo de motor antes de 1885. El aumento de vehículos se ha realizado en un tiempo relativamente corto y el trazo de las calles no ha sufrido una transformación que esté de acuerdo con tal aumento. Y esto ha hecho que se transfiera en un serio problema el transporte urbano.

El transporte urbano como cualquier otro sistema de transporte consta de tres elementos importantes: vía, vehículo y usuario. En forma general este sistema mantiene los mismos aspectos que el sistema carretero, pero en cada elemento

se tienen particularidades tan especiales y diferentes que - hace necesario tomarlo en cuenta como un sistema diferente.

Debemos distinguir dos tipos principales de movimiento de un centro de población: los externos y los internos. La magnitud de unos y de otros depende principalmente del tamaño de la población y de la distancia que guarda con respecto a otras.

Cuanto más grande sea una ciudad, en mayor proporción - dominarán los movimientos internos sobre los externos. En toda ciudad habrá un porcentaje de tránsito que pasa a través de la misma sin detenerse. Y debe pasar a través porque el trazo vial heredado exigía el paso de las carreteras por el centro de las poblaciones.

Los movimientos internos de la ciudad se han generado - básicamente entre la periferia y el centro comercial, gubernamental y bancario. Al desarrollarse las ciudades, han surgido otros centros comerciales que se han convertido también en polos de atracción. De esta manera, en una ciudad con un solo centro comercial, la mayor parte de los movimientos diarios son de tipo radial, es decir de la circunferencia al -- centro y viceversa.

Si examinamos la hoja de una planta vemos que está llena de conductos o venas que llevan la savia a la pequeña rama, después a la rama más gruesa y finalmente al tronco. A medida que estos conductos se acercan al tronco hay más caudal y por lo tanto adquieren una mayor capacidad.

Un caso muy semejante sucede en los movimientos de personas y efectos en una ciudad. Los volúmenes de vehículos y

de personas crecen a medida que nos acercamos al centro de la ciudad o a un centro secundario. Una simple revisión del mapa de volúmenes de tránsito de una ciudad nos comprueba que el caudal aumenta cuanto menor sea la distancia al centro.

En la primera mitad del siglo XX se ha llegado a reconocer que el advenimiento de vehículos de motor, además de ser un gran invento del hombre y un factor de desarrollo económico y social, también constituye un grave problema. La mayor parte de los técnicos en tránsito y transportes han convenido en que el enfoque más adecuado a la atención del problema consiste en un equilibrado programa de desarrollo de los transportes masivos combinado con un ambicioso plan de obras viales, incluyendo las necesarias autopistas urbanas, que trate de superar las limitaciones del viejo trazo de las ciudades.

Las autoridades del Departamento del Distrito Federal prosiguen la tarea, dentro de los planes de largo alcance, para dotar a la ciudad de un sistema arterial, constituido por vías radiales y anillos concéntricos.

2.6.2 Planeación.

El proceso de planeación aplicado al sistema de transporte urbano debe prever las necesidades del transporte futuras, conociendo las actuales, para plantear la modificación-

de los componentes del sistema con objeto de satisfacer dichas necesidades.

Aplicando al sistema de transporte urbano los lineamientos generales para un proceso de planeación, se tiene:

- a) **Diagnóstico:** Por medio de indicadores, encuestas, métodos de investigación y estudios estadísticos se llega al conocimiento de la oferta y la demanda.
- b) **Objetivos:** El sistema de transporte urbano tiene como finalidad directa proporcionar al usuario un servicio de movilidad dentro de la ciudad que satisfaga la demanda de un modo eficiente mediante la modificación de la oferta.
- c) **Generación de alternativas de solución:** Para obtener los objetivos fijados.
- d) **Evaluación de alternativas:** Se comparan los beneficios y los costos de cada una de las alternativas para seleccionar la más conveniente al logro de los objetivos planteados.
- e) **Control:** En cada uno de los pasos mencionados se debe realizar un control para que se cumplan las funciones específicas.
- f) **Correcciones:** Se deben implementar procedimientos de corrección para cuando no ocurran los efectos previstos.

2.6.2.1 Componentes del sistema de transporte urbano.

Son tres los componentes del sistema: es decir, los tres componentes básicos del sistema de transporte son:

1. **Infraestructura:** Elementos relacionados con la oferta de espacio y estructuras viales; se incluyen tipos de vía, estacionamientos, señalización, etc.
2. **Estructura:** Formada por las características de los medios de transporte como son la capacidad de transportación, la potencia de transporte, condición de operación, etc.
3. **Superestructura:** Involucra indirectamente la demanda de transporte por parte del usuario.

Los tres elementos son variables, es decir, susceptibles a ser modificados por el planificador y constituyen los elementos básicos de proyecto.

2.6.2.2 Ingeniería de Tránsito.

La Ingeniería de Tránsito es la parte de la Ingeniería Civil que se ocupa de la planeación, el proyecto geométrico y la operación del transporte en las calles y carreteras.

Los estudios de Ingeniería de Tránsito son una herramienta fundamental en la planeación del sistema de transporte porque permite conocer el funcionamiento del sistema en las condiciones actuales, además de que ayudan a detectar las causas básicas del funcionamiento deficiente cuando esto ocurra, y por último, es posible generar alternativas de so-

lución, actividades que corresponden al proceso establecido por la planeación. El resultado de los estudios de Ingeniería de Tránsito será el conocimiento de las condiciones en que opera el sistema de transporte.

Se pueden dividir estos estudios en dos grandes ramas que son: **estudios administrativos y estudios operacionales.** Los primeros se refieren al desarrollo y mantenimiento de los inventarios de vías, transportes, señales, etc. Los segundos por su parte, se enfocan a los niveles de servicio que se ofrece a los usuarios del sistema.

1) **Estudios administrativos:** Como se indicó, son los inventarios de la oferta del sistema de transporte, estos estudios son:

- a) Inventario de avenidas, calles y callejones.
- b) Inventario de los dispositivos de control.
- c) Inventario de servicio de transporte.
- d) Inventario de estacionamiento.

Estos inventarios constituyen la parte fundamental para realizar el diagnóstico de la oferta de espacio y estructuras viales, y de la oferta de medios de transporte.

ii) **Estudios de operaciones:** Los estudios operacionales son los que indicarán el tipo de funcionamiento del sistema, es decir, si la oferta de transporte satisface la demanda del servicio. Entre estos estudios se incluyen los de capaci

dad, de uso del suelo, intersecciones conflictivas, velocidad, densidad, volúmenes de tránsito, de tiempo de recorrido y demoras, de accidentes, y de origen y destino.

a) **Capacidad vial:** La capacidad vial se define como el número de vehículos que pueden circular por un carril o por una vía en general durante un determinado lapso de tiempo que frecuentemente se considera de una hora. La función principal es la de indicar el grado de eficiencia del camino analizado.

La determinación de la capacidad depende de las características de los volúmenes de tránsito, del número de carriles de circulación, de las condiciones climatológicas y de las características geométricas del camino analizado;

y su objetivo es, además de conocer las condiciones de operación, el pronosticar el funcionamiento de un camino proyectado o el de una calle a la que se van a realizar cambios.

En el análisis de capacidad se utiliza ampliamente el concepto de nivel de servicio que indica las condiciones de operación que experimentarán los vehículos al circular por la calle. El nivel de servicio está directamente relacionado con el volumen de tránsito que circule, esto significa que mientras menos sea el volumen, mejor será el nivel de servicio y viceversa, al aumentar los volúmenes el nivel de servicio descenderá, el límite al que puede llegar el nivel de servicio es la capacidad.

La capacidad en las arterias urbanas depende principalmente

te de la capacidad de las intersecciones a nivel que se encuentran a lo largo de la arteria, analizadas en forma aislada, aunque en el análisis de nivel de servicio se considera la arteria en toda su longitud.

La cantidad de vehículos que pueden pasar a través de una intersección depende de las características geométricas y de operación de los caminos, de la influencia de las condiciones ambientales, de las características de la corriente del tránsito y de las medidas de control.

Para conocer el nivel de servicio de una arteria urbana se debe investigar el efecto que tienen las interrupciones y las intersecciones sobre la operación del tránsito analizándose después la arteria en toda su longitud para determinar un valor promedio de la relación volumen-capacidad (V/C). Esto permitirá conocer la naturaleza verdadera de las condiciones operacionales.

b) Centros generadores de tránsito (uso del suelo): Son aquellas zonas de la ciudad que captan un gran núcleo de la población que emplean diversos medios de transporte para llegar a ellas. En términos generales, la demanda de movilización no puede ser satisfecha por los medios de transporte que atraviesan esas zonas en las horas de máxima demanda, no obstante que se satura la capacidad de las calles que se encuentran en dichas áreas, por lo que el sistema de transporte que comunique a los centros generadores deberá aumentar su capacidad de transportación para dar un servicio eficiente, además de que se evitará el aumento en tiempos de recorrido, la disminución de la ve-

- densidad y el alargamiento de las horas pico.
- El conocimiento de los centros generadores de tránsito, en combinación con datos socioeconómicos como densidad de población, niveles de ingresos y rutas de transporte, permitirá determinar los medios de transporte adecuados para satisfacer la demanda actual y realizar pronósticos acerca de los futuros requerimientos de movilización.
- c) Intersecciones conflictivas: Las intersecciones son simplemente los cruces que hay entre dos o más calles pudiendo ser a nivel o a desnivel; las interferencias entre las diversas corrientes de tránsito representan peligros de colisión por lo cual deberán tener características físicas que garanticen la seguridad de los usuarios. El volumen de tránsito en composición y su velocidad de operación son los factores que definen el tipo de intersección que sea apropiada.
- Generalmente las intersecciones que mayor problema representan para la libre fluidez del tránsito han sido rebasadas en su capacidad y los semáforos agravan la situación al estar programados inadecuadamente por lo que es necesario determinar el tiempo que tarda cada vehículo por carril en cruzar la intersección, y por lo tanto, el número de vehículos que cruzan la intersección durante el periodo de luz verde.
- d) Estudios de velocidad: Cuando el trayecto no se cubre de manera uniforme, surgen variaciones en el concepto "velocidad". En la vialidad urbana son raros los casos en los que el torrente vehicular circula con velocidad uniforme-

debido al gran número de demoras causadas por factores --
 tan diversos como los semáforos, el estado del pavimento,
 descomposturas del vehículo, congestionamientos, etc., --
 por lo que se utilizan otros conceptos de velocidad.

La "velocidad global" es aquella velocidad en la que el --
 tiempo incluye el de recorrido y el empleado en los retar--
 dos, esta velocidad es con la que opera realmente el trán--
 sito y se puede conocer con diversos estudios de veloci--
 dad como el de "velocidad de punto" y la "velocidad de mo--
 vimiento".

La "velocidad de punto" es la velocidad instantánea de un
 vehículo cuando pasa por un punto dado de una vía.

La "velocidad de marca o de cruceo" es la relación entre
 la distancia recorrida y el tiempo en el cual esta en mo--
 vimiento.

La "velocidad de proyecto" es la velocidad máxima con la--
 que pueden circular los vehículos dadas las característi--
 cas geométricas de la vía.

La "velocidad de operación" es la máxima velocidad a la --
 que puede circular un vehículo bajo las condiciones preva--
 lecientes del tránsito.

- e) Estudios de volúmenes de tránsito: Los estudios de volúme--
 nes de tránsito se realizan para conocer la eficiencia de
 los caminos, es decir, son una medida de la capacidad ---
 vial. Como se ha mencionado, el volumen de tránsito es el
 número de vehículos que pasan por la arteria en estudio --
 en un intervalo de tiempo dado. Dependiendo del objetivo--
 del estudio, los intervalos más usados son el día y la ho

ra. Estos estudios se realizan en forma de encuestas para la obtención

Los métodos más usados para la determinación de los volúmenes de tránsito son: método automático y método manual.

- f) Estudio de tiempos de recorrido: El tiempo de recorrido de un viaje se inicia en el momento en que arranca el vehículo y termina cuando el vehículo se detiene en el lugar de destino, por lo tanto, incluye el tiempo en el que el vehículo circula y el tiempo en el que el vehículo permanece detenido por demoras y corresponde al tiempo empleado para determinar la velocidad global.

El estudio de tiempos de recorrido es muy útil en la planeación de nuevos sistemas de transporte y en la cuantificación del nivel de servicio que ofrecen las vías. Para determinar los tiempos de recorrido existen varios métodos: método del vehículo en movimiento, método de observaciones aéreas, método de las placas y método de tacógrafo.

- g) Estudios de accidentes: Los estudios de accidentes se realizan para determinar la peligrosidad de lugares específicos en las arterias viales.
- h) Estudios de origen y destino: Los estudios de origen y destino se utilizan para conocer las características de las líneas principales de demanda y así aprovechar convenientemente al sistema vial y los medios de transporte disponibles.

Estos estudios constituyen una de las herramientas más útiles en la planeación del sistema de transporte urbano puesto que permiten conocer la ubicación de los lugares de origen y destino, el tiempo de viajes entre ambos, el

medio de transporte empleado, el uso de la tierra tanto en el origen como en el destino y algunas características socioeconómicas de los usuarios. En otras palabras, son los estudios relacionados con los desplazamientos físicos de personas y bienes, así como de los medios de transportación.

Los estudios de origen y destino se clasifican en: estudios de origen y destino para intercomunicación indirecta y estudios de origen y destino para intercomunicación directa.

iii) Técnicas de simulación aplicadas a la Ingeniería de Tránsito: Como se ha mencionado, la simulación representa -- situaciones reales por medio de modelos formales y permite el conocimiento de una situación futura sin que ésta necesariamente se lleve a cabo. Los modelos que hasta ahora se han aplicado en la Ingeniería de Tránsito son: asignación de tránsito, distribución de tránsito, elección de modos de transporte, asignación de rutas y uso del suelo.

En los modelos se combinan criterios técnicos y criterios socioeconómicos que influyen en forma directa en el funcionamiento del sistema. Los criterios técnicos emplean los resultados de velocidad, tiempo de recorrido, origen destino, estacionamiento y los de inventarios vial y de medios de transporte, entre otros. Los criterios socioeconómicos se basan en la evolución demográfica, en la población económicamente activa, en los niveles de empresas, etc.

2.6.2.3. **Evaluación de alternativas.** Como se mencionó en el primer capítulo, el objetivo principal de este estudio es evaluar el impacto ambiental y social de un proyecto de transporte. Para ello, se debe considerar las alternativas de transporte que se proponen y evaluarlas en función de sus características y de su impacto ambiental y social.

El siguiente paso en la planeación es la generación y evaluación de alternativas. En la generación de alternativas se proponen modificaciones a los componentes del sistema. Para pronosticar el comportamiento del sistema con las modificaciones propuestas sin que éstas se lleven a cabo, en la realidad se hace uso de modelos de simulación.

El proyectista idea varias alternativas y se evalúan una a una con el modelo sin perder el objetivo básico que se persigue.

En esta etapa del proyecto el encargado de tomar decisiones, debe evaluar cada alternativa independientemente de acuerdo con el objetivo fundamental del proyecto, es decir, la implementación de un sistema de transporte eficaz. El proceso de evaluación se debe ejecutar individualmente porque cada alternativa seguramente tendrá características subjetivas muy difíciles de representar o cuantificar con números reales, son ejemplos: la determinación de las preferencias de los usuarios al cambiar de medios de transporte, la cuantificación en dinero por partículas contaminantes aspiradas, la modificación de calles para vehículos en peatonales, etc.

i) Análisis "beneficio-coste": Este análisis toma en cuenta beneficios y costos cuantificables. Los beneficios son generalmente ahorros en dinero y en tiempo por concepto de menores tiempos de recorrido y menores costos de opera---

ción. Los costos son generalmente por adquisición de derecho de vía, terracerías, pavimentación, señalización, mantenimiento y todos los relacionados con la construcción o modificación de las vías. Se calcula el horizonte económico del proyecto y se traen a valor presente tanto los beneficios como los costos; la alternativa que tenga el mayor índice (conocido como "índice de rentabilidad") será la más adecuada. Este tipo de análisis será discutido más ampliamente en el siguiente capítulo.

ii) Análisis "costo-efectividad": En el análisis "costo-efectividad", se consideran los mismos costos del anterior análisis, pero los beneficios ya no son una hipotética representación monetaria, sino una apreciación de los objetivos alcanzados por cada alternativa. A cada costo se asocia una medida de efectividad, es decir, cada alternativa tendrá un costo en millones y su efectividad se dividirá en velocidad, comodidad, frecuencia de transporte público, sincronización de semáforos, etc. Con puntuación de 1 a 100, se recomendarán aquellos que tengan mayor efectividad aunque es conveniente no comprometerse sino presentar la situación de cada alternativa al decisor.

Conviene indicar que el encargado de tomar las decisiones debe utilizar estos análisis como simples estimadores de la situación dadas sus restricciones y utilizar información más completa a la experiencia de personas capacitadas en el tema para llegar a la solución más adecuada. Este tipo de análisis también será tratado posteriormente.

2.6.3 Proyecto.

Como se ha mencionado en los sistemas antes referidos, el sistema de transporte consta de tres elementos básicos: vía, vehículo y usuario.

2.6.3.1 Vía.

La infraestructura vial es el conjunto de los elementos físicos que tienen relación con la circulación de los vehículos y de los peatones. Está constituida por las calles y avenidas sobre las que transitan los vehículos, por las banquetas, los dispositivos de control, los estacionamientos, la señalización, la iluminación, los puentes, los pasos a desnivel, etc.

Las vías urbanas son calles y avenidas que se dividen en dos tipos: el primario y el secundario.

El primer tipo o sistema vial primario está formado por los siguientes tipos de vías:

1. Autopistas Urbanas de Circulación Continua, con intersecciones a desnivel y acceso controlado.
2. Avenidas de dos o más carriles con sentido único de circulación o con dos sentidos separados por unas líneas de señalización o por un camellón central. Tienen capacidad si

milar a las autopistas, pero su nivel de servicio es menor por la existencia de semáforos, de carriles para esta cionamiento y porque se permite la circulación de vehículos pesados aunque el acceso es parcialmente controlado.

3. Calles principales de dos carriles de circulación por sentido que son semejantes a las avenidas de dos carriles, pero no tiene control de acceso.

El segundo tipo o sistema vial secundario, está formado por las calles colectoras que comunican al tránsito con la red principal y por las calles locales que son utilizadas por los usuarios de las propiedades colindantes.

Las banquetas son las partes del espacio vial destinadas a que los peatones puedan circular con seguridad y libertad de movimiento. Se colocan generalmente a los lados y/o en el centro de la superficie vial.

1) Dispositivos de control: Los semáforos son dispositivos que regulan y controlan la circulación del tránsito en las intersecciones de las vías o en puntos conflictivos, su operación se basa en aparatos electromecánicos, electrónicos y recientemente en computadoras, y constan de los siguientes elementos:

1. Unidad Óptica: Está formada por un portalámpara en el que se fija una lámpara incandescente de 60 a 70 watts que iluminará una lente difusora de color verde, rojo o ámbar.
2. Caja: Para proteger la unidad óptica.

3. Accesorios: Dispositivos para unir cajas seccionales y formar el semáforo, flechas, crucetas y tubos.

La clasificación de los semáforos se basa en el mecanismo de operación de los controles que regulan la duración y la secuencia de las indicaciones luminosas:

1. Semáforos para regular el tránsito de vehículos.

2. Semáforos para peatones.

3. Semáforos especiales.

La utilidad de los semáforos, en caso de que se instalen y funcionen correctamente, presentan las siguientes ventajas:

- a) Interrumpir el tránsito intenso en una vía, para permitir el paso de vehículos y peatones en la otra.
- b) Reducir la frecuencia de accidentes como atropellamientos y colisión en ángulo recto.
- c) Coordinar el tránsito y controlar la velocidad.
- d) Representar una economía considerable en comparación con el control manual en intersecciones donde se necesita asignar alternativamente el derecho de paso.

11) Estacionamientos: Dentro del sistema vial urbano, es de gran importancia la existencia de un número adecuado de estacionamientos que puedan satisfacer la demanda de los vehículos; cuando esta demanda de estacionamiento es mayor que

por así se hacen notorios los efectos que ocasionan en la oferta, los vehículos se estacionan en la vía pública, obstruyendo uno o más carriles de circulación y por lo tanto, disminuyendo la capacidad de la calle y la velocidad de operación. Frecuentemente, la demanda supera a la oferta en zonas congestionadas, situación que se origina en la ubicación de centros generadores de tránsito en calles de mínima capacidad y en la gran cantidad de vehículos en circulación.

Los diferentes tipos de estacionamientos son:

1. Por su ubicación pueden ser: en la vía pública o en edificios.
2. Por su operación se dividen en: de autoservicio, atendidos por choferes acomodadores y electromecánicos.
3. Por la disposición de los cajones de estacionamiento: los cajones de estacionamiento pueden estar dispuestos en corredón y en batería.
4. Por la actividad de los usuarios.

La demanda de estacionamientos es el número de cajones para estacionamiento que se requieren en un área determinada y en un intervalo de tiempo especificado. La demanda se puede cuantificar de dos maneras: el número de vehículos estacionados en un momento dado y el número de vehículos estacionados durante un intervalo de tiempo. Los vehículos estacionados incluyen los que están en la calle y los que están en el inmueble.

iii) Señalización: Se define como señalización al conjunto

de indicaciones para orientar al conductor acerca de las restricciones, informaciones y prevenciones que existen para el tránsito. Además, tienen gran importancia en la prevención de accidentes.

Se establecen tres tipos de señales como se había mencionado en el inciso de transporte carretero y son: señales preventivas, señales restrictivas y señales informativas.

2.6.3.2 Vehículo.

Se refiere a los medios de transporte urbano que son todos aquellos vehículos que hacen uso de la infraestructura vial. Según el servicio que prestan se dividen en: privados y públicos. Los vehículos privados son aquellos que proporcionan servicio de movilización a su propietario. Los vehículos públicos proporcionan transportación en forma colectiva desde unos cuantos pasajeros como en los taxis, hasta varios cientos como ocurre en el ferrocarril metropolitano, cobrando dinero en todos los casos por el servicio prestado. Dependiendo del tipo de motor a usar los vehículos se dividen en: eléctricos, de gasolina y de diesel.

Los principales medios de transporte urbano son los siguientes:

- a) Autobús urbano: Es el vehículo que transporta el mayor porcentaje de la población en la ciudad de México. Su ca-

pacidad y su número lo hacen el vehículo más solicitado, además de que por su versatilidad y su independencia de estructuras especiales para la circulación se le considera como el más flexible de los medios de transporte.

- b) **Tranvías:** Son vehículos que funcionan con motor eléctrico siendo sus principales desventajas el requerir de instalaciones especiales como cables aéreos y rieles en detrimento de la estética urbana y el depender del suministro de energía eléctrica, además de que no puede cambiar de dirección con facilidad y rapidez por lo cual tiene que ocupar un solo carril y dar las vueltas con gran lentitud. Esto es lo que se llama carencia de autonomía y flexibilidad. Las ventajas que tiene sobre otros medios de transporte son; sobre todo, la nula contaminación atmosférica, la despreciable contribución al ruido cotidiano, el bajo costo de su servicio y la gran capacidad de transporte.
- c) **Trolébus:** Es una variante mejorada del tranvía, carece de rieles de circulación aunque conserve el motor eléctrico y los cables aéreos, puede efectuar cambio de carril aunque sigue siendo lento en las curvas, no es contaminante y tiene gran capacidad de transportación de pasajeros.
- d) **Automóviles de alquiler sin ruta fija (taxis):** Son automóviles que mediante una tarifa por distancia o tiempo proporcionan servicio exclusivo a los usuarios que lo requieren, trabajan con altos costos de operación y por lo tanto es elevado el precio de transporte. Su capacidad de transportación es muy baja, lo cual significa que para satisfacer una demanda cualquiera necesitarán mucho más es-

pacio de circulación que los medios de transporte antes --
mencionados.

e) Automóviles de alquiler con ruta fija (taxis colectivos):

Son automóviles que siguen un itinerario fijo y pueden --
transportar pasajeros que tengan diferentes destinos pero --
con una ruta fija, por esta razón tienen una capacidad ma --
yor de la de los taxis que dan servicio particular e ex --
clusivo, aunque no deja de ser pequeño.

f) Automóviles particulares: Son los que ocupan el mayor por --
centaje del torrente vehicular, los que tienen los costos --
de operación mas elevados, su capacidad de transporte es --
la más baja de todos los vehículos, son los mayores pro --
ductores de partículas contaminantes por pasajero trans --
portado, su velocidad en zonas congestionadas es similar --
a la del resto de los medios de transporte que circulan --
por calles y avenidas, el consumo de energía es muy gran --
de y las facilidades de estacionamiento son casi nulas. --
Sin embargo, es el vehículo que tiene mayor demanda; las --
razones aparentes de esta paradójica situación son las --
evidentes comodidades que sugiere el tener un vehículo --
disponible en cualquier momento y el confort con que se --
realiza el viaje.

g) Sistema de Transporte Colectivo (Ferrocarril Metropolita --
no): El metro se diferencia de los demás medios de trans --
porte en las características siguientes:

1. Capacidad: En el metro de la Ciudad de México, cada --
convoy está formado por nueve vagones cada cual tiene --

— resupe para 170 personas, por lo que la capacidad del —
 —av aconvoy es de 17530 pasajeros.

2. Contaminación: El metro funciona por medios electróni-
 cos lo que hace que no haya contribución al deterioro-
 de la calidad del aire ni al aumento de los ruidos de-
 la ciudad.

3. Seguridad: Las estadísticas de accidentes anuales indi-
 can que el porcentaje imputable al metro es desprecia-
 ble. Debido a que tiene calzadas exclusivas para circu-
 lar, se eliminan gran parte de las posibilidades de ac-
 cidentes.

4. Velocidad: El metro puede desarrollar velocidades máxi-
 mas del orden de 80 kph, pero considerando las demoras
 por concepto de ascenso y descenso de pasajeros, la ve-
 locidad convencional es de 33.3 kph, lo cual se tradu-
 ce en un ahorro importante por concepto de reducción -
 en el tiempo de recorrido.

5. Comodidad: Como el equipo es de rodada neumática se --
 eliminan la vibración y el ruido que otros medios de --
 transporte producen.

h) Motocicleta.

i) Bicicleta.

j) Transporte peatonal.

k) Otros: Están constituidos por los vehículos que reparten-
 mercancía y personal.

Por otra parte, para proyectar correctamente las carac-

terísticas geométricas de las calles es necesario conocer — las características dimensionales y operacionales de los vehículos. Estas características son: dimensiones, radio de giro y trayectoria de las ruedas, relación peso-potencia y aceleración y desaceleración.

2.6.3.3 Usuario.

El tercer elemento del sistema de transporte urbano es el usuario, sea conductor o peatón. Los problemas del tránsito le afectan directamente aunque esos problemas son originados en parte por el mismo usuario.

El comportamiento del usuario, si es peatón, determinará sobre todo un gran número de atropellados. La falta de educación vial se observa en los actos imprudentes de los peatones como cruzar las calles fuera de la zona de seguridad, caminar sin precaución sobre la superficie de circulación vehicular, tratar de ganar al vehículo al atravesar las arterias, etc., que generalmente tienen consecuencias lamentables.

... de las necesidades de transporte en un país en desarrollo, se debe tener en cuenta el nivel de desarrollo económico y social, así como el tipo de industria y comercio que predomina en el país.

3. INGENIERIA DE SISTEMAS APLICADA A LOS

SISTEMAS DE TRANSPORTE.

3.1 LA APLICACION DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS A LA PLANEACION DE SISTEMAS DE TRANSPORTE.

Los capítulos anteriores nos han proporcionado un vasto panorama sobre los aspectos importantes de la Ingeniería de Sistemas y los Sistemas de Transporte. En el presente capítulo lo ocuparemos de integrar los conceptos ya tratados con el fin de conocer cómo puede utilizarse esta metodología en la planeación de este tipo de sistemas.

Cuando se estudian problemas de transporte de gran escala, los sistemas que deben ser considerados dejan de ser estrictamente técnicos. Las consideraciones tecnológicas en estos casos forman solamente una pequeña parte del problema total, por lo que el sistema de transporte tiene que ser analizado como un elemento integral de una compleja estructura social, económica y política. Por estas razones, la Ingeniería de Sistemas es muy útil para la planeación de este tipo de sistemas.

La existencia de una cierta red de servicios de trans--

porte en una región generalmente es el resultado de las necesidades, anticipadas o no, de tipo político y/o económico de la sociedad. El tipo de sistema de transporte que se desarrolle tendrá un impacto radical y permanente en la región servida.

Los sistemas de transporte pueden clasificarse en tres tipos: sistemas nacionales, regionales y urbanos. La tabla 3.1 identifica los sistemas anteriores considerando que el contenido de la misma es sólo una ilustración y no una definición formal de estos sistemas. La tabla presenta algunas características y factores que deben tomarse en cuenta en la selección del sistema físico de transporte; o sea, la configuración de la red del sistema, el tipo de vehículos, etc.

A nivel nacional es probable que el sistema requiera servir un conjunto de regiones, donde cada región consta de un grupo de estados y/o municipios que posean algunas características en común. Los sistemas nacionales de transporte no sólo deben servir las necesidades locales, sino que también deben proveer las conexiones con otros sistemas de transporte que unen el nivel nacional con el resto del mundo.

Usualmente un sistema de transporte no existe en un vacío con respecto a otros sistemas de transporte, sino que invariablemente opera en fase con otros medios de transporte que sirven al mismo sector de la sociedad. La tercera columna de la tabla 3.1, conexiones con otros medios de transporte, sugiere que un sistema nacional debe tener importantes lazos con medios locales y sistemas internacionales de transporte.

TIPO DE SISTEMA	AREAS DE SERVICIO	CONEXIONES	OBJETIVOS ECONOMICOS	SECTORES AFECTADOS	OBJETIVOS SOCIO-PO-LITICOS	CARACTERISTICAS FISICAS	Características de la red
NACIONAL	GRUPOS DE REGIONES	SISTEMAS INTERNACIONALES DE TRANSPORTE, O SISTEMAS LOCALES	DESARROLLO NACIONAL E. INTERNA-CIONAL	SECTOR AGRICOLA, TURISTICO, E INDUSTRIAL (PESADO)	DIRECCION DE MOVI-MIENTOS IN-DUSTRIALES Y DE POBLA-CION	DISTANCIAS LARGAS, BAJA FRE-CUENCIA DE USO, ALTAS VELOCIDADES	POCAS CONEXIONES O TERMIN-ALES
REGIONAL	ESTADOS Y MUNICIPIOS	MEDIOS DE TRANSPORTE URBANOS	CRECIMIENTO INDUSTRIAL Y ECONOMI-CO REGIONAL	INDUSTRIA ESPECIALI-ZADA, GRU-POS DE EMPLEADOS	DESARROLLO DE AREAS POBRES, INDUSTRIA-LIZACION REGIONAL	DISTANCIAS CORTAS, RE-GULAR FRE-CUENCIA DE USO, Y RE-GULAR VE-LOCIDAD	REGULAR NÚMERO DE TERMIN-ALES
URBANO	AREAS METROPOLI-TANAS	SISTEMAS REGIONALES, MEDIOS LO-CALES DE TRANSPORTE	DESARROLLO LOCAL IN-DUSTRIAL ECONOMICO	INDUSTRIAS LOCALES Y COMERCIO	DESARROLLO URBANO PLANIFICADO	DISTANCIAS CORTAS, VE-LOCIDADES BAJAS, SÓLO PASAJEROS	MUCHAS TERMINALES

TABLA 3.1 Varios tipos de sistemas de transporte.

El desarrollo de ciertas regiones o estados puede incluirse entre los objetivos económicos de un sistema nacional de transporte. La operación de ese sistema afectaría grandes sectores industriales y/o agrícolas de la economía y por su naturaleza, podría tener un impacto favorable en una fuente importante de ingresos: el turismo. La implementación del sistema también podría tener algunos objetivos sociopolíticos, tales como el desarrollo de la industria, incentivos para migraciones de población hacia zonas subdesarrolladas, etc.

La configuración física y el equipo de un sistema nacional de transporte tiene que satisfacer todos los aspectos geográficos, políticos, económicos y sociales del problema. Para lograrlo deben considerarse factores tales como durabilidad y orientación hacia transporte de carga y hacia altas velocidades. La última columna de la tabla 3.1 sugiere que, en lo referente al aspecto de configuración de la red del sistema de transporte, un sistema nacional deberá ser diseñado para proveer pocas conexiones, mientras que los alimentadores locales tendrán que poseer muchas terminales para que los usuarios lleguen a ellos con mucha facilidad.

El segundo sistema de transporte presentado en la tabla 3.1 es el sistema regional. Comúnmente, este tipo de sistema sirve a un grupo de estados o municipios y opera en conjunto con otros medios de transporte regionales o urbanos.

Los objetivos económicos de los sectores afectados por un sistema regional serían más específicos y estarían más concentrados geográficamente, que en el caso de transporte -

nacional. Un sistema regional no sólo contribuye al desarrollo económico e industrial regional, sino también afecta a ciertos sectores de la fuerza laboral. Por ejemplo, los sistemas modernos de transporte de alta velocidad hacen posible que ahora cierto tipo de trabajadores pueda vivir más lejos de su trabajo. Entre los objetivos de un sistema regional de transporte se podrían incluir el desarrollo de áreas subdesarrolladas y/o la industrialización de ciertas zonas en la región.

En general, la frecuencia de uso de un sistema de transporte regional es mayor que en el caso de un sistema nacional y no requiere necesariamente de altas velocidades. Debido a la gran cantidad de movimiento de carga dentro de una región, y comparado con un nivel nacional, no es muy claro que un sistema regional deba proveer iguales facilidades de transporte de carga y transporte de pasajeros; al contrario, en la mayoría de los casos es deseable separar el transporte de pasajeros del transporte de carga. En el caso de sistemas regionales, las redes de transporte deben tener conexiones más numerosas con otros sistemas de transporte que en el caso de sistemas nacionales.

Por último, se consideran los sistemas urbanos, los cuales son más comunes para la mayoría de las personas, no tanto por su existencia en la mayoría de las ciudades del mundo, sino por su ausencia. Los componentes de un sistema urbano de transporte deben operar en distancias cortas, a velocidades relativamente bajas y en áreas de altas densidades de tránsito. La frecuencia de uso es muy alta en este tipo de

sistema, y no siempre aparece el problema de decidirse por transporte de carga o de pasajeros.

La Ingeniería de Sistemas, para contribuir a la solución de problemas de transporte, debe desempeñar una función básica en la etapa de planeación de sistemas de transporte, puesto que sus técnicas hacen posible que los grupos no-técnicos y los ejecutivos (aquellos que toman decisiones) conozcan una serie de alternativas factibles que les faciliten la última decisión. En el problema de transporte sí se entienden y cuantifican muchos aspectos importantes a diferencia de lo que sucede en problemas de tipo legal o sociológico — donde ciertos factores de importancia no pueden ser cuantificados y son difíciles de entender. Existen, por ejemplo, datos tecnológicos y procesos operativos de sistemas de transporte que pueden representarse matemáticamente, tales como flujo de tránsito, políticas de servicio y distribución de recursos. Sin embargo, no siempre son claras las interacciones entre los factores tecnológicos y los aspectos socioeconómicos de un problema de transporte.

La figura 3.1 representa el problema integrado de planeación de un sistema de transporte. Los aspectos sociales, económicos, políticos y tecnológicos del problema están íntimamente relacionados. El proceso de planeación comienza con una estructura socioeconómica y política, lo cual produce ciertas necesidades o requerimientos de transporte y una serie de políticas de servicio, de tipo social y financiero. Una política de tipo social podría ser el establecimiento de algún estándar o regla de prevención de contaminación que el

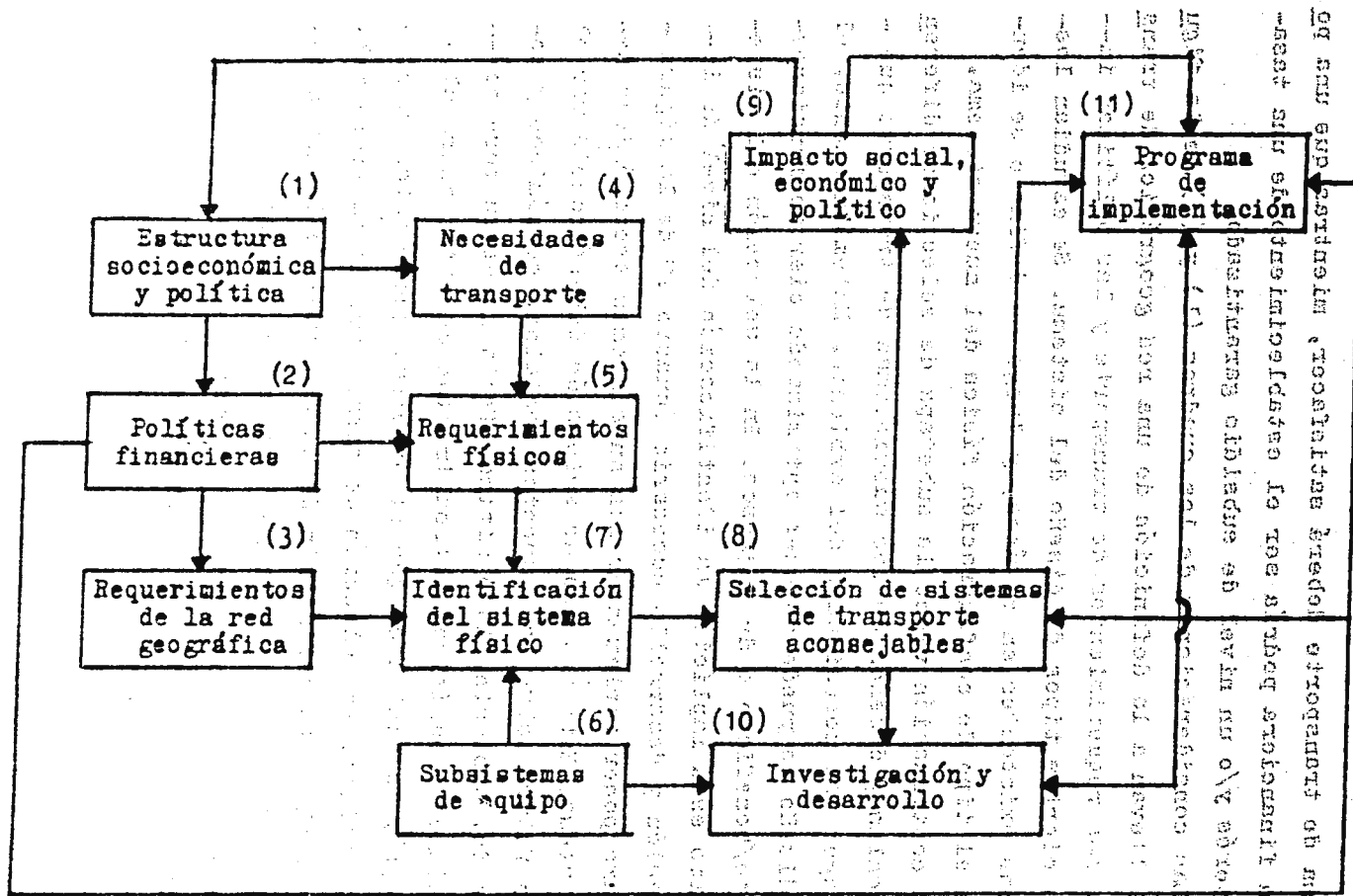


Fig. 3.1 El método integrado de planeación de un sistema de transporte.

sistema de transporte deberá satisfacer, mientras que una política financiera podría ser el establecimiento de una tasa de interés y/o un nivel de subsidio garantizado.

Las consideraciones de los cuadros (1) y (2) de la figura 3.1 llevan a la definición de una red geográfica de transporte. Los requerimientos de transporte y las políticas implican ciertos tipos de diseño del sistema. Se estudian los sistemas existentes en el área, y luego se define o se identifica el tipo de configuración física del nuevo sistema.

A continuación viene la subetapa de seleccionar diferentes escalas y diseños de los subsistemas de transporte que satisfagan las necesidades del ambiente. Matemáticamente, el mejor diseño se puede obtener optimizando ciertas funciones de costo/beneficio o de ingresos. En la selección del sistema óptimo está implícita la identificación del nivel de investigación y desarrollo necesario (cuadro 10 de la figura 3.1) para poder implementar los subsistemas tecnológicos de este sistema. Este proceso de selección deberá considerar el impacto futuro sobre los aspectos sociales, económicos y políticos del ambiente. Esto último afecta la estructura socioeconómica y política, retroalimentan de esta manera al cuadro (1), lo cual hace que el problema quede interconectado por completo. La selección de cierto estado factible del sistema implica la definición de un programa de implementación que refleja las decisiones hechas, el equipo necesario para la etapa de investigación, la etapa de desarrollo, las políticas de servicio, las políticas sociales y las finanzas antes identificadas.

(2)

El problema integrado de planeación de transporte incluye la selección de sistemas de transporte como parte integral del complejo socioeconómico de la región que será beneficiada. Frecuentemente no se puede resolver por completo este problema, puesto que muchas de las interacciones sociotécnicas no siempre son muy claras. Como en el caso de muchos problemas matemáticos no-lineales, la linealización o la descomposición del problema pueden ayudar a entenderlo y resolverlo. No obstante, no es posible garantizar necesariamente la obtención de la solución óptima.

Una de las alternativas para lograr tal descomposición es la que presenta la figura 3.2, la cual representa una porción de la figura 3.1. Comenzando por la identificación de la configuración física y los requerimientos de la red geográfica, se hace una identificación de cierto tipo de configuración preliminar del sistema (cuadro b) que permita la selección de un sistema de transporte que represente una primera aproximación a las alternativas que se deberán seleccionar.

Una mejor aproximación de la configuración del sistema (cuadro d) se obtiene en términos de una red geográfica más específica. La descomposición consta de la investigación sucesiva y sistemática de varias políticas de servicio del sistema de transporte. En seguida se puede evaluar el impacto financiero y socioeconómico de las alternativas (cuadro f), o la selección de un sistema y un programa para su implementación.

El método interconectado de la planeación de sistemas -

(3)

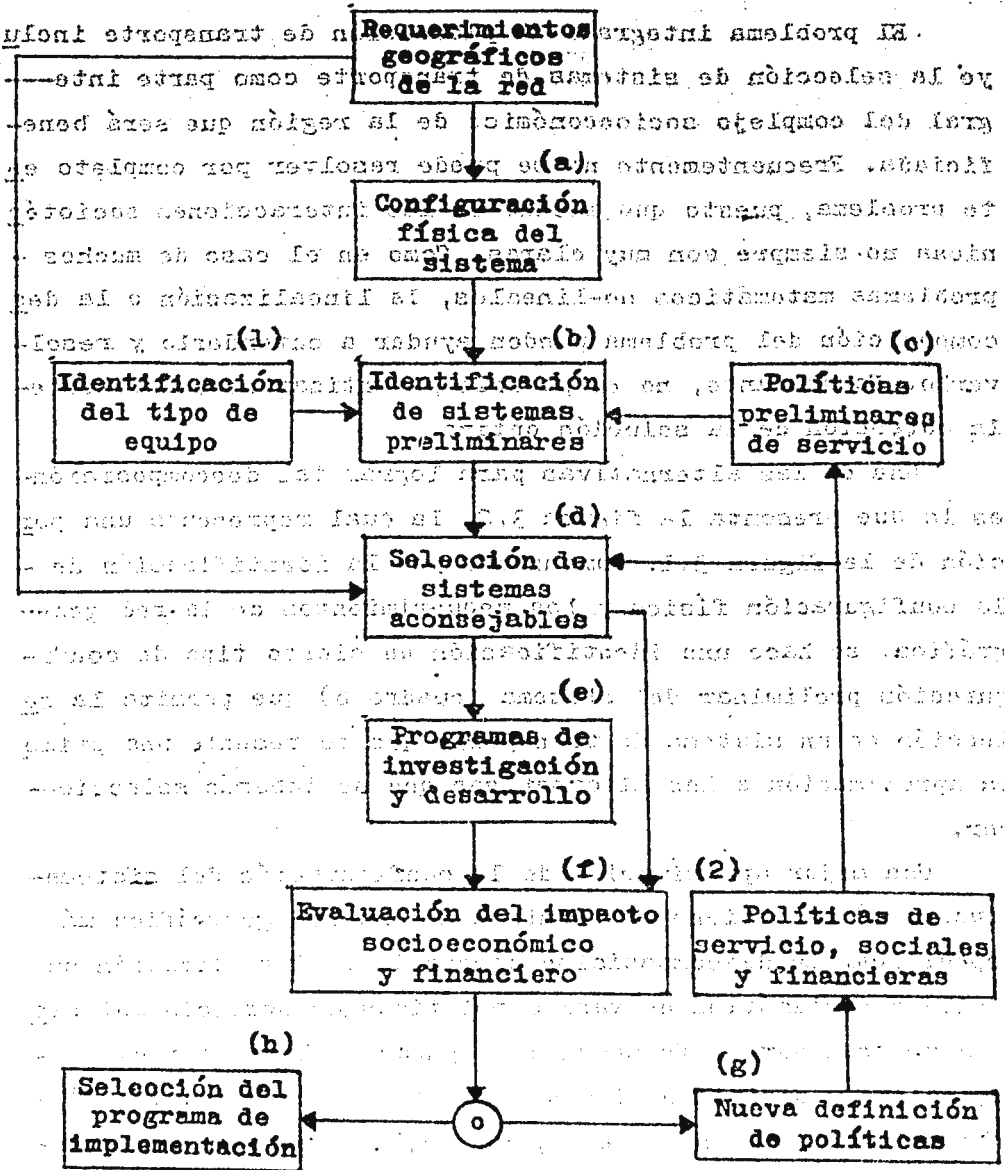


Fig. 3.2 El método interconectad de planeación de un sistema de transporte.

de transporte, esquematizado en la figura 3.2, simplifica el problema de optimización ya que examina sucesiva y sistemáticamente, para cada alternativa de transporte, las implicaciones de varias alternativas de servicio y configuración del sistema.

Las técnicas de la Ingeniería de Sistemas aplicadas a la planeación de sistemas de transporte de gran escala son generalmente las técnicas utilizadas en otros sistemas complejos, tales como sistemas de recursos hidráulicos, sistemas industriales, y otros. Citemos como ejemplo un estudio de un sistema regional de transporte que puede ser dividido en cuatro fases (ver figura 3.3). Para el éxito de cada fase son indispensables la disponibilidad de datos y ciertas técnicas de simulación u optimización.

Los tres tipos principales de datos necesarios para este problema son (figura 3.4):

- a) Datos de política.
- b) Datos físicos.
- c) Datos socioeconómicos.

Los datos de política están relacionados con las metas propuestas por los diseñadores del sistema. Este tipo de datos indican los objetivos del servicio ofrecido por el sistema, tales como los tiempos mínimos de duración de transporte entre terminales, grado de comodidad deseado para los pasajeros, etc.

Los datos físicos están constituidos por la información

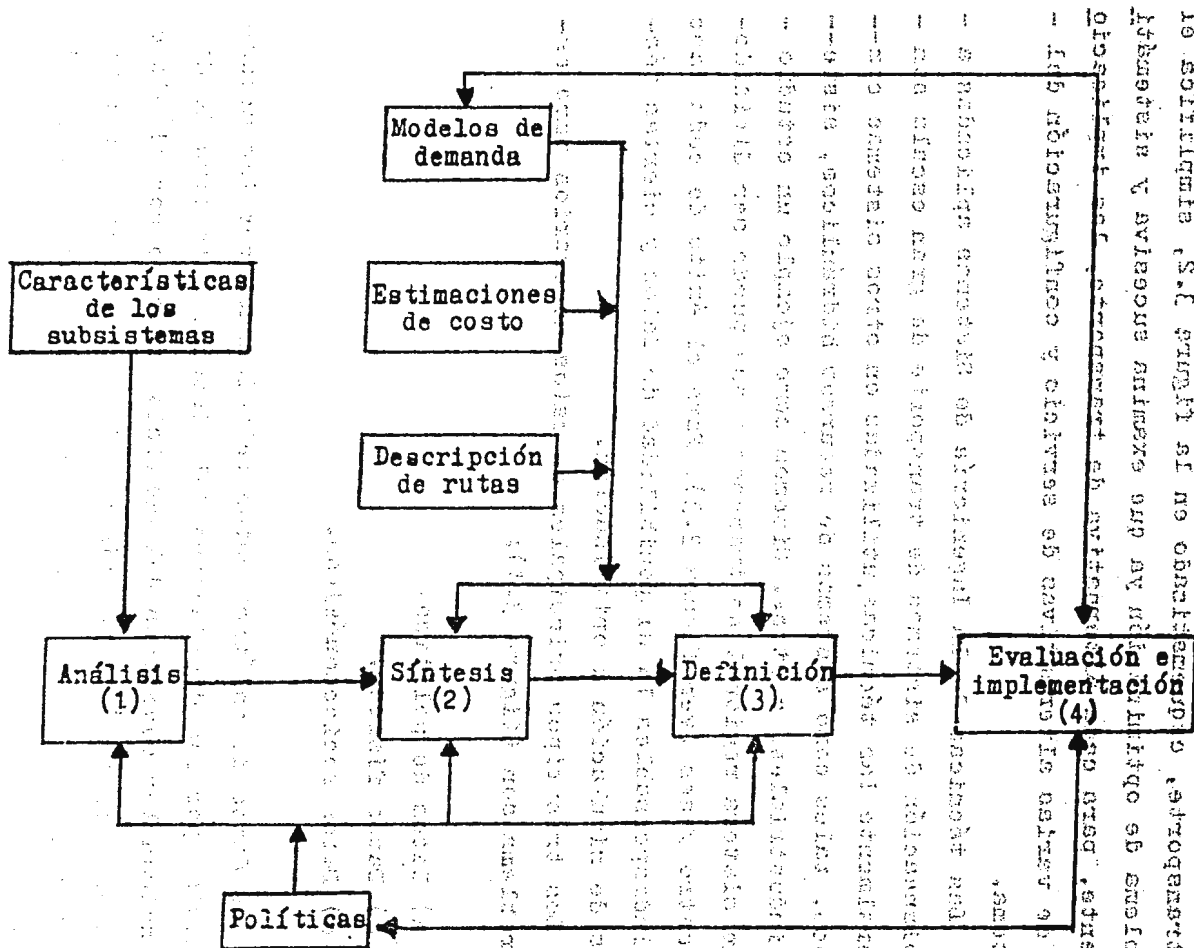


Fig. 3.3 Las cuatro fases de planeación de un sistema de transporte

... de información de equipo de procesamiento de datos y de sistemas de comunicación de datos, para el análisis de los datos de campo, para el análisis de los datos de campo, para el análisis de los datos de campo...

DATOS DE POLITICA

- Servicio
- Comunidad
- Seguridad
- Vida del sistema
- Comodidad

Especificación de objetivos

DATOS FISICOS

- Equipo
- Vehículos
- Control
- Mantenimiento
- Geofísica
- Rutas
- Terreno
- Geología
- Hidrología
- Clima

Factores de efectividad

Descripción de rutas

DATOS SOCIOECONOMICOS

- Modelos de uso
- Desarrollo económico
- Migraciones de población
- Demanda de pasaje
- Modelos de costo
- Investigación y desarrollo
- Sistema físico (equipo)
- Capital

Modelo de demanda

Estimaciones de costo

Fig. 3.4 Requerimientos de datos para la Ingeniería de Sistemas de transporte.

geográfica y la información de equipo. La selección de las alternativas de transporte, por ejemplo, estarán limitadas primordialmente por la disponibilidad de cierto tipo de equipo y sistemas físicos de transporte tales como subsistemas de control, vehículos deseados, red de distribución, etc. Los datos geofísicos describen los tipos de terreno, topografía, geología, hidrología y condiciones climáticas de la región estudiada.

Finalmente, los datos socioeconómicos se relacionan con modelos de demanda que describen los requerimientos de transporte entre las diferentes terminales del sistema; también se relacionan con las funciones de estimación de costos de equipo y servicios del sistema.

Por otra parte; el análisis, síntesis, definición y evaluación-implementación (figura 3.3) son considerados como las cuatro etapas fundamentales de planeación de un sistema de transporte.

En la etapa de análisis, se desarrollan varias representaciones o modelos matemáticos y empíricos de los diferentes subsistemas de importancia. Ese desarrollo facilita la selección preliminar de configuraciones físicas del sistema, lo cual se lleva a cabo en la segunda etapa. La etapa de análisis tiene que examinar detalladamente todos los factores que afecten la viabilidad o factibilidad del sistema de transporte.

En la etapa de síntesis, se jerarquizan las condiciones o "estados atractivos" de los tipos de sistemas examinados en la primera etapa. Un estado atractivo de un sistema se de

fine como el vector de condiciones (diseño, escala, complejidad, etc.) de los subsistemas que obtenga el óptimo (el máximo o mínimo) de una función o criterio de efectividad, tal como el costo/beneficio, el costo-beneficio, etc. Una función de efectividad típica en sistemas de transporte podría ser costo/viaje-km. Restricciones típicas son el máximo de aceleración de los vehículos de transporte, la distancia mínima entre vehículos, y las dimensiones de los vehículos. En la realidad siempre existen muchas más restricciones de las que son necesarias considerar en esta etapa.

El resultado de la optimización consta de una descripción física del vehículo, incluyendo el subsistema de control (eléctrico, nuclear, etc.) y otros más. En esta etapa, también se determinan ciertas características especiales del sistema que afectan la optimización, tales como el diámetro de un túnel o la anchura de una vía, lo cual siempre afecta al diseño del vehículo de transporte.

En la etapa de definición, los resultados de la optimización del proceso de síntesis se interpretan o se transforman en políticas detalladas de servicio, configuraciones específicas de la red de transporte, etc. En esta etapa se tiene que estudiar con especial interés las posibilidades de combinar diferentes medios o tipos de transporte dentro del sistema.

Finalmente, en la etapa de evaluación-implementación se evalúa detalladamente el impacto que produce la alternativa seleccionada sobre el ambiente socioeconómico. Tal evaluación se puede hacer mediante una serie de modelos socioeconó

Si el sistema óptimo provee los servicios inicialmente deseados; si el sistema es una fuente de ingresos; si los costos de pasaje, la rapidez y flexibilidad del sistema son tales que puedan mantener la demanda de pasaje a un nivel deseado; si el impacto producido por el sistema sobre la redistribución de población e ingresos es el esperado; entonces el sistema es adecuado. Si alguna de las condiciones anteriores exige una revisión de las metas fijadas en las etapas de síntesis y definición del sistema, se tendrá que establecer una retroalimentación. En esta etapa de planeación también se definen los programas de implementación del sistema. En otras palabras: los resultados de esta fase constituye las recomendaciones hechas al grupo de ejecutivos.

3.2 UN ENFOQUE DE SISTEMAS PARA LA PLANEACION DE TRANSPORTE.

Este inciso se ocupa de la planeación de sistemas de transporte con especial interés en la aplicación de un enfoque coordinado.

El enfoque coordinado para un diseñador de automóviles, por ejemplo, podría ser el diseño total de un vehículo de transporte terrestre. Por lo tanto, se considerarían los factores mecánicos, tales como la velocidad y potencia; los factores de diseño, tales como la capacidad y dimensiones del vehículo; los factores de funcionamiento, tales como acclera

ción, economía, seguridad, etc.; y los factores estéticos, -
 de comodidad, ruido, imagen y otros. Por otra parte, el inge-
 niero automotriz le daría poca importancia al tipo y locali-
 zación de los caminos y carreteras que su vehículo utilizará.
 Además, inclusive si este ingeniero quisiera considerar es-
 tos últimos factores, se encontraría que no está capacitado-
 para ello.

El diseño de redes de transporte generalmente se consi-
 dera como una tarea de ingeniero civil, para quien un enfo-
 que de diseño coordinado incluiría las especificaciones de -
 diferentes rutas, la pendiente de la superficie terrestre, -
 las condiciones del suelo que afectarían las especificacio-
 nes de peso y refuerzos para la estructura superficial de la
 carretera, consideraciones de características climatológicas,
 etc., poco le interesaría si los vehículos que fueran a uti-
 lizar su carretera tuvieran un determinado tipo de suspen-
 sión u otras consideraciones.

Para un ingeniero de sistemas, el enfoque coordinado in-
 volucra un punto de vista totalmente exhaustivo e integral -
 hacia el problema. Tal punto de vista incluiría los aspectos
 de diseño del medio de transporte, de la red de vías utiliza-
 das y de todos aquellos factores relacionados con la obten-
 ción de la solución de máximo beneficio.

Una estrategia efectiva para el diseño de un sistema de
 transporte deberá incluir por lo menos los siguientes aspec-
 tos:

- a) El diseño óptimo de vehículos de transporte.

- ,sooitatue aerofotat aof y ;.ote ,lubirugea ,almoroso ,dolo
- b) **El diseño de redes de vías, incluyendo la planeación en tiempo.**
- timof y ogit is sionetropat aocq alubó el xitometas otain
- c) **El impacto en el ambiente.**
- ,braafitú ofuoidesv de oap eatefearno y aadinas aof ob dolosa
- d) **El impacto social.**
- --es ,vraibitueo braafitúe ofubregat aocq ta eviaionat ,eabafé
- e) **El impacto económico.**
- obafitueo aofa ob oap braafitueo de ,vraafotat ,vraafitú oof
- f) **El impacto psicológico.**

oiffo aocq

- ,lance es ofuonifareneq atrogunant ob oobax ob ofeafis EN

Sólo cuando todos estos factores contribuyen productivamente al diseño integral del sistema, podemos estar seguros de que se ha formulado el sistema de transporte maximiza beneficios.

3.2.1 Consideraciones del diseño de sistemas de transporte.

El transporte es simplemente el mecanismo por medio del cual los humanos y las cosas se mueven de un lugar a otro. La necesidad de movimiento existe por las siguientes razones:

1. Para obtener bienes.
2. Para obtener o proveer servicios.

Todo tipo de transporte se utiliza por una u otra de las razones anteriores. Cualquier sistema de transporte efectivo debe satisfacer las necesidades para ser exitoso; por lo tanto, consideramos la lista anterior como las metas de "primer nivel" o primarias de cualquier sistema bien diseña-

Otro concepto importante es la movilidad, la cual definiremos como la libertad potencial o la habilidad para moverse en la forma que se desea. Aunque la movilidad es parcialmente dependiente del movimiento, los dos conceptos no son sinónimos.

La planeación racional e integral del transporte debe estimular el movimiento de bienes hacia las gentes y no lo opuesto. Existen varias razones importantes del porqué es conveniente enfatizar este movimiento. Primeramente está la conveniencia práctica de esta estrategia. El costo del transporte es por lo general función directa del volumen o peso masa.

Considérese que si movemos los bienes a sus consumidores, tenemos sólo el costo del peso o volumen de los bienes. Sin embargo, si el consumidor va hacia los bienes, tenemos no únicamente el costo de mover estos bienes, sino también debemos agregar el costo del viaje redondo de mover al consumidor. Asimismo, hay que mencionar que es costumbre obtener varios bienes en un viaje al mismo tiempo y no hacer un viaje para la adquisición de cada bien, lo cual amortiza el costo del viaje redondo con todos los bienes y servicios que se obtienen en el mismo. Empero, debemos estar conscientes de que existen millones de consumidores que hacen esto y usualmente todos a ciertas horas del día. Dicha observación cobra relevancia cuando se habla de una escala de grandes masas de personas.

Una segunda razón es que los bienes generalmente no requieren la estética o el confort que la gente espera en su

transporte, ni tampoco existen restricciones severas de su programación en tiempo. Por ejemplo, siempre y cuando un paquete se entregue con oportunidad, no deberá importar si el receptor tiene habilidad al momento de recibirlo si dicho paquete ha esperado dos o tres horas para una conexión de transferencia durante su transporte; tal espera, en el caso de una persona, posiblemente podría ser de gran inconveniencia.

Una desventaja de la proposición expuesta consiste en que las personas, por medio del hábito de adquirir lo que necesitan en diferentes lugares, pueden observar y obtener aquello que desean exactamente; mientras que el transporte de bienes hacia la gente requeriría estandarizar los productos.

Superficialmente cualquier sistema parecería estar bien diseñado si satisface todas las metas primarias de transporte, pero tal sistema podría fallar si en su diseño no se han considerado otros factores importantes que llamaremos de "segundo nivel" o metas secundarias. No debe mal interpretarse el título "secundario"; éste no implica que se refieren a factores no importantes o de segunda categoría, porque éstos pueden ser realmente cruciales. Se les llama así sólo porque cuando se considera el objetivo de transporte, éstos parecen secundarios en relación al suministro de "movimiento" que satisface tal necesidad.

Las metas secundarias incluyen:

1. Economía.
2. Conveniencia.
3. Estabilidad.

4. Sensibilidad.

-La sensibilidad se usa cuando, siempre que exista un punto de vista en el que se debe

-debe al caso del que se debe en un punto de vista, cuando

Los factores económicos incluyen los de los usuarios, individuales, los de grupo y los del proveedor del transporte.

Por consiguiente, el costo al usuario del sistema de transporte debe ser tal que él pueda realmente pagar el transporte que desea. No es suficiente hacer este juicio con base so-

lamente en el costo por viaje. Aun cuando el costo por viaje

sea bajo, el número total de viajes que se requieren es grande, por lo que el costo al usuario podría resultar muy alto.

Por lo tanto, el factor de diseño que se deberá considerar aquí es el producto de costo por viaje, multiplicado por el número de viajes que se requieran.

Además de los factores económicos directos, también se pueden agregar otros factores indirectos, incluyendo: a) tiempo, b) materiales no procesados y c) espacio. Es importante que el tiempo que el usuario requiere para obtener el transporte sea razonable. En forma similar, el uso de los recursos que se requieren para la construcción de sistemas de transporte debe guardar una proporción atractiva con los beneficios que se derivarán de tal uso.

Los factores de conveniencia son quizá un poco más difíciles de cuantificar que los económicos; éstos incluyen la comodidad del usuario, la funcionalidad o facilidad de uso, y otros. Si un sistema o elemento de transporte no es cómodo o agradable en su uso, éste no se utilizará óptimamente.

Un sistema de transporte inestable es uno en el cual, el acto de utilizarlo una vez, genera aun mayor uso. O visto

desde un punto de vista diferente, cuanto más se utiliza el sistema, tanto más se necesita éste. En tal caso, la dependencia de los usuarios hacia su uso continuará aumentando sin límites hasta que alguna restricción natural o conceptual se violen. Las restricciones autolimitantes incluyen el uso de la tierra disponible (o rutas de uso), insolvencia financiera, falta de tiempo, etc.

Por otra parte, no todos los factores de inestabilidad son indeseables, inclusive algunos de éstos se incluyen en un sistema de transporte bien diseñado.

El último factor secundario que se considera es la sensibilidad. Los sistemas bien diseñados no deben exhibir sensibilidades excesivas hacia condiciones de clima, cambios drásticos de demanda y otros factores del transporte. Entre menores sean estas sensibilidades, más independiente se hace el sistema y más controlable tiende a ser su operación.

El éxito del enfoque de sistemas se basa en su habilidad para estructurar las consideraciones y análisis de todos los factores que se necesitan para un diseño efectivo.

3.2.2 Geometría del transporte.

La existencia de diferencias geométricas es lo que genera gran parte del movimiento que necesitamos para poder tener movilidad. Si no fuera por el hecho de que las necesidades se localizan en lugares diferentes de donde se desean, -

tendríamos muy poco de qué preocuparnos respecto al problema de transporte.

Un modelo conceptual generalizado de la geometría de una zona urbana típica se ve en la figura 3.5. Nótese la distribución general de las áreas de población, empleo, compras y servicios. Nótese también que esta distribución es en núcleos. Ciertas secciones pueden ser clasificadas como predominantemente residenciales, comerciales, industriales, etc.

Varios de los factores que contribuyen a los problemas de transporte se relacionan con el hecho que existe una separación física entre las zonas residenciales primarias y las zonas primarias de compras, servicios y trabajos. Puesto que las actividades diarias dependen de la interrelación entre estas zonas, existen ciertas restricciones al diseño del transporte.

La solución a los problemas geométricos de transporte es difícil. Un remedio sería mezclar todas las zonas en una forma homogénea. En tal caso, las zonas urbanas estarían más cerca a las zonas de trabajo, de compras, de servicios, etc. La longitud de viaje promedio sería mucho menor y consecuentemente el transporte sería menos costoso, con menos ruido y problemas ambientales.

La mayoría de los problemas geométricos pueden resolverse con estrategias geométricas. Sin embargo, estos remedios geométricos requieren cuidadosa selección y diseño para poder evitar efectos secundarios serios que compensarían cualquier ventaja obtenida por ellos.

La clave para la solución del problema de transporte es

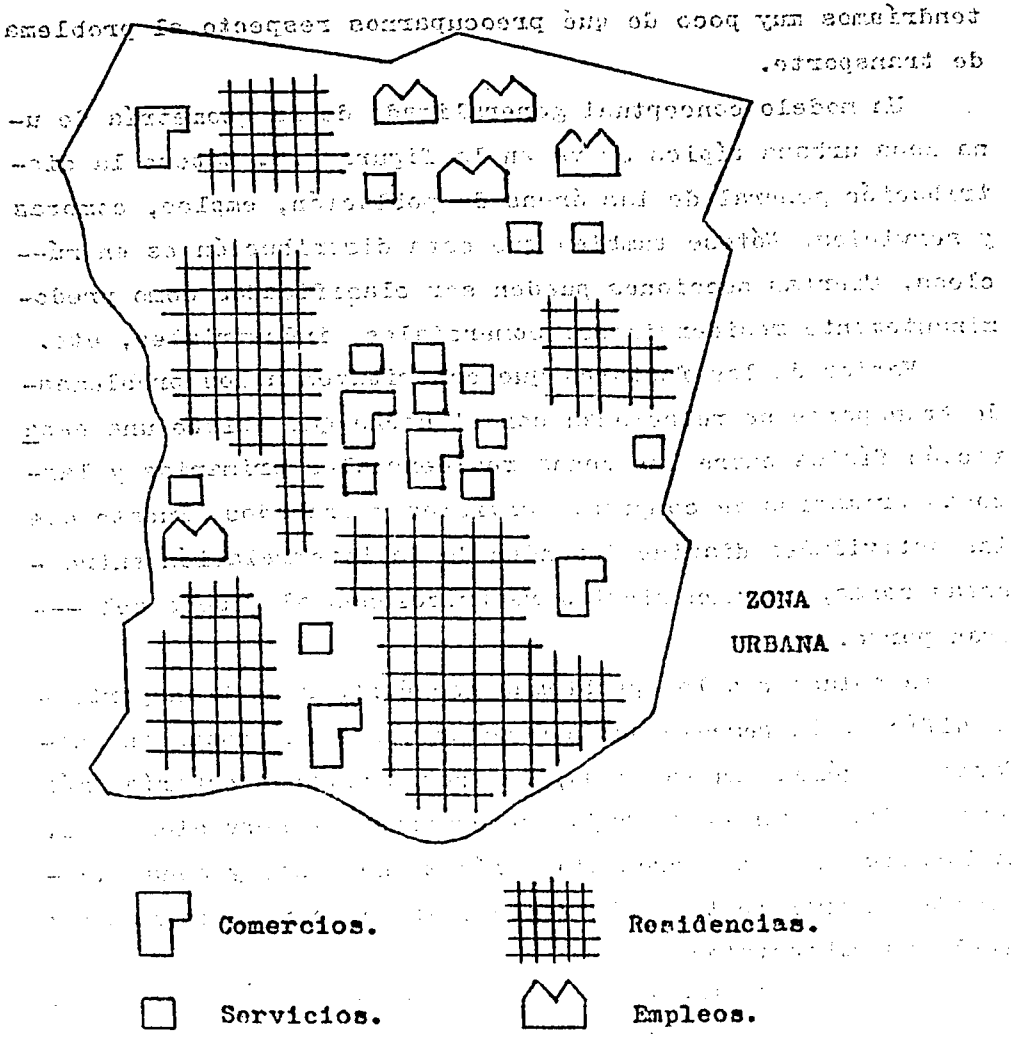


Fig. 3.5 La geometría para el transporte.

la planeación de los usos de la tierra. Esta planeación se dirige de modo directo hacia los problemas de:

1. Distribución: es difícil imaginar un sistema de transporte que pudiera efectivamente y a bajo costo, mover cualquier persona de un lado a otro, y a cualquier hora.
2. Separación: la tierra debe estar separada según los patrones compatibles de usos para mejor eficiencia, belleza y compatibilidad hacia la vida.
3. Densidad: el uso de la tierra debe ser compatible con la capacidad de la misma para soportar tal uso.

Por lo tanto, la planeación del uso de la tierra es una herramienta efectiva que tiende a la maximización del movimiento, reconociendo que el diseño del sistema de transporte tiene un efecto profundo en la creación última de estilos de vida y la productividad de la sociedad.

Los intentos para resolver el problema de transporte abordan cuatro aspectos principales:

1. Diseño del vehículo.
2. Minimización de la resistencia al flujo.
3. El control del sistema de transporte.
4. Diseño urbano.

3.2.3 Los costos del transporte.

es "Algunos de los factores que contribuyen al costo de la movilidad son: la contaminación, los energéticos y el uso de la tierra; aspectos que no se reflejan necesariamente en el precio al usuario. Entendemos por costo lo que en realidad se paga por un producto o servicio, mientras que el precio es lo que se piensa que se está pagando."

El costo del transporte es alto. Alrededor de un 20% del gasto público de los países en vías de desarrollo, se relaciona con el transporte, además se espera un incremento en el futuro debido a la escasez mundial de recursos y energéticos cada vez más crítica. En este caso, el costo es el precio, más las pérdidas en que la sociedad incurra, por no utilizar esa energía para otros propósitos. Específicamente, el petróleo se refina para producir gasolina, combustible de turbinas, aceites y lubricantes, etc. Sin embargo, el petróleo también se utiliza en la producción de plásticos y polímeros, y en otras áreas de la industria química y, por lo tanto, lo que se ocupa en energéticos, no puede ser utilizado para producción.

Dentro de los costos ambientales podemos enumerar los siguientes: la contaminación atmosférica y del agua, el ruido, la degradación estética y otros. El transporte debe estar diseñado desde un punto de vista ambiental y estético, además de ingenieril. La ecología y los recursos hidráulicos se ven afectados por los transportes. Operaciones de relleno y corte de cerros que modifican los cursos de agua y alteran el comportamiento hidrológico de una cuenca pueden alterar la flora y la fauna de la región.

El sistema de carreteras contribuye a la contaminación de la atmósfera con gases y sustancias tóxicas que despiden los vehículos, tales como el monóxido de carbono, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de sulfuro y el plomo.

La construcción de arterias urbanas disminuye el espacio libre para parques y lugares de recreo públicos, ayuda al establecimiento de barreras psicológicas y visuales, destruye el carácter e identidad de la comunidad y seguidamente en el desplazamiento y movilización drástica de núcleos de población afectados por la destrucción de sus hogares.

El funcionamiento de un aeropuerto, puede generar deterioro del ambiente, a causa del ruido de los aviones y las operaciones del aeropuerto en general. Los aeropuertos ocupan grandes áreas de terreno y su localización puede tener consecuencias significativas en la ecología de la región. Un aeropuerto causa importantes cambios en el uso de las carreteras del área y con frecuencia genera congestionamientos en los caminos de acceso al mismo. Sin embargo, cualquier intento para resolver estos problemas ambientales, también debe considerar las implicaciones que involucra un aeropuerto, como componente del sistema de transportes de la región.

Por otra parte, ningún sistema de transporte público es atractivo a sus usuarios si éstos son presionados psicológicamente. Horarios inseguros, conexiones mal planeadas, equipaje extraviado, procedimientos complejos, rutas confusas, largas esperas, disponibilidad de servicio incierta, falta

de personal de apoyo al usuario, y otras dificultades, incrementan la ansiedad y preocupación del pasajero. Las complicaciones del viajar, especialmente para una persona de edad avanzada o un inválido, pueden ser casi tan graves como puede ser una enfermedad real.

La incertidumbre genera presiones al usuario y debe evitarse. La asistencia rápida y cortés por parte de personal bien informado y disponible en las principales terminales del sistema es necesaria. Las señales deben ser claras y deberán utilizarse gráficas y figuras para ayudar al viajero extranjero en la medida que sea posible.

El ruido, por otro lado, es un producto inevitable del transporte de pasajeros y carga. En las zonas urbanas el nivel promedio de ruido ambiental es principalmente resultado de los vehículos de motor. Esta observación es cierta también para aquellas zonas rurales localizadas cerca de las carreteras.

Este problema requiere investigar la propagación del ruido, su intensidad y frecuencia, así como una serie de otros aspectos técnicos.

La magnitud de los ruidos que son generados por distintos vehículos se indica en la figura 3.6.

Un procedimiento sistemático para estimar los daños del ruido cerca de los aeropuertos, desarrollado en los E.E.U.U., es el llamado "Proyección de Contaminación de Ruido NEF". Como su nombre implica, ésta es una herramienta para predecir al futuro los impactos de ruidos aéreos en las comunidades cercanas a los aeropuertos. Tal información nos da ayuda de-

—El nivel de ruido en la tierra y el nivel de ruido en la atmósfera de las aeronaves y la tierra.
 —El nivel de ruido en la tierra y el nivel de ruido en la atmósfera de las aeronaves y la tierra.
 —El nivel de ruido en la tierra y el nivel de ruido en la atmósfera de las aeronaves y la tierra.

—El nivel de ruido en la tierra y el nivel de ruido en la atmósfera de las aeronaves y la tierra.
 —El nivel de ruido en la tierra y el nivel de ruido en la atmósfera de las aeronaves y la tierra.
 —El nivel de ruido en la tierra y el nivel de ruido en la atmósfera de las aeronaves y la tierra.

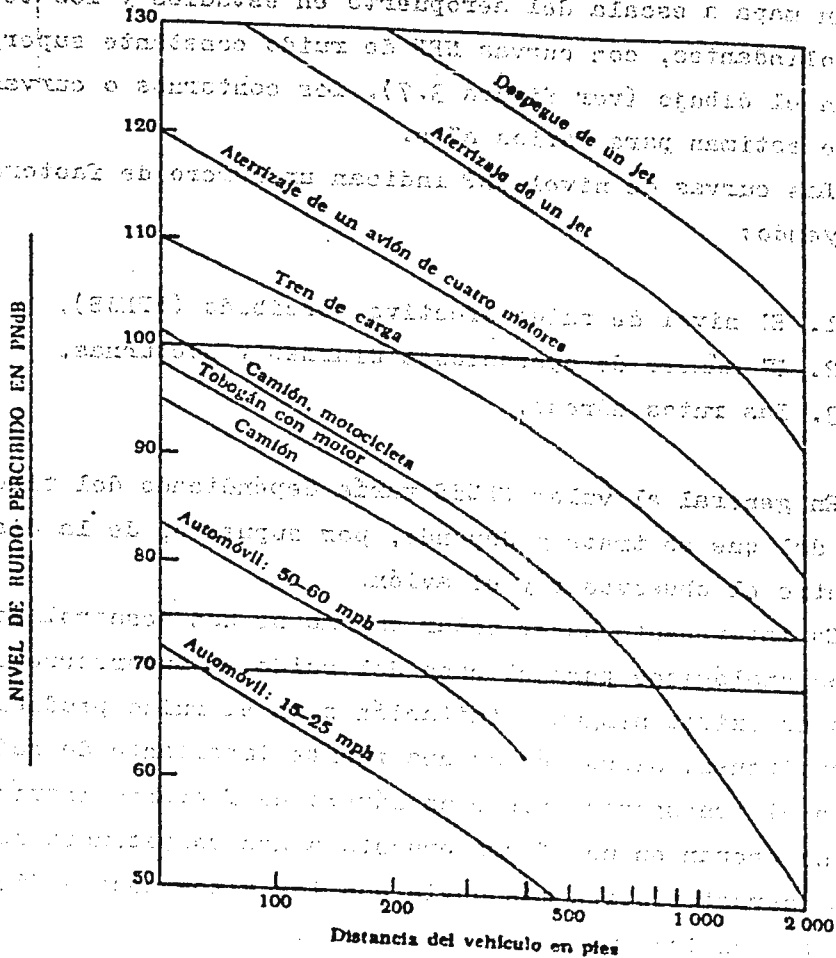


Figura. 3.6 Niveles típicos de ruido para diferentes vehículos.

gran valor en la planeación de uso de la tierra y la zonificación urbana alrededor de los aeropuertos.

Este procedimiento se compone de dibujos que representan un mapa a escala del aeropuerto en estudios y los terrenos colindantes, con curvas NEF de ruido constante superpuestas en el dibujo (ver figura 3.7). Los contornos o curvas NEF se estiman para varios años.

Las curvas de nivel NEF indican un número de factores, incluyendo:

1. El nivel de ruido efectivo percibido (EPNdB).
2. El número de operaciones diurnas y nocturnas.
3. Las rutas aéreas.

En general el valor EPNdB varía dependiendo del tipo de avión del que se trate y depende, por supuesto, de la distancia entre el observador y el avión.

Es interesante hacer notar que no se han desarrollado modelos analógicos para el caso del ruido en supercarreteras. Además no existe ninguna limitación para el ruido producido por los trenes, siendo éstos una fuente importante de ruido.

En el transporte existe un número de factores intrínsecos, que operan en una forma opuesta a una competencia normal. La característica más obvia son los altos costos fijos inherentes en todo medio de transporte.

La proporción de costos fijos a costos variables difiere considerablemente de un medio a otro.

Además, la irreversibilidad e inflexibilidad de las in-

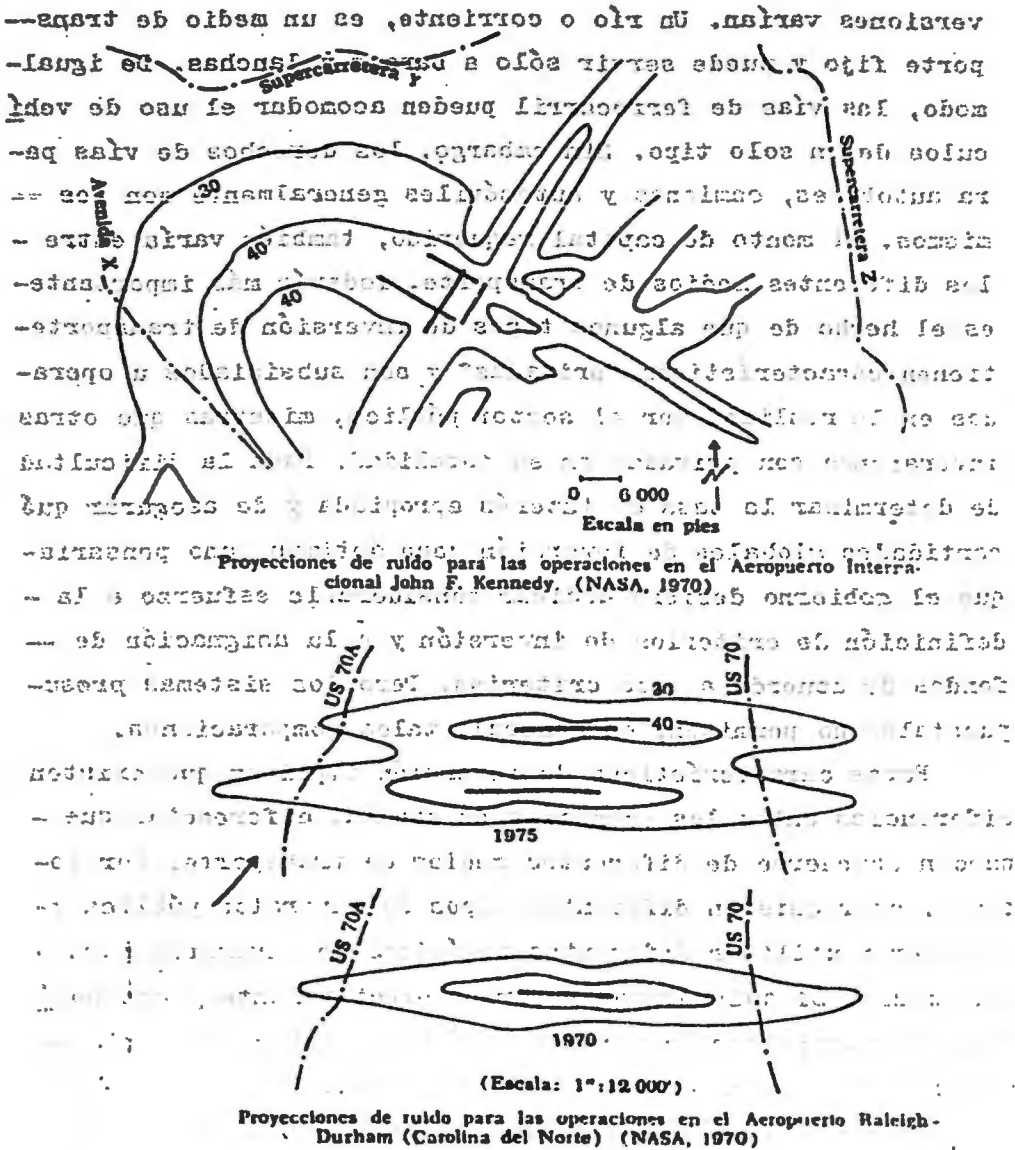


Figura. 3.7

versiones varían. Un río o corriente, es un medio de transporte fijo y puede servir sólo a barcos y lanchas. De igual modo, las vías de ferrocarril pueden acomodar el uso de vehículos de un solo tipo. Sin embargo, los derechos de vías para autobuses, camiones y automóviles generalmente son los mismos. El monto de capital requerido, también varía entre los diferentes medios de transporte. Todavía más importantes es el hecho de que algunos tipos de inversión de transporte tienen características "privadas" y son subsidiados u operados en la realidad por el sector público, mientras que otras inversiones son privadas en su totalidad. Dada la dificultad de determinar la tasa de interés apropiada y de asegurar que cantidades globales de inversión sean óptimas, uno pensaría que el gobierno debería dedicar considerable esfuerzo a la definición de criterios de inversión y a la asignación de fondos de acuerdo a esos criterios. Pero los sistemas presupuestales no permiten, en general, tales comparaciones.

Estas características de inversión implican que existen diferencias entre las economías de escala, diferencias que pueden obtenerse de diferentes medios de transporte. Por lo tanto, se requieren diferentes tipos de inversión pública y se deberán utilizar diferentes políticas de inversión para cada medio. Si asignáramos recursos efectivamente y con políticas de participación privada y pública, sería necesario desarrollar mejores criterios de inversión.

El servicio de transporte es en gran parte, no transferible e imposible de almacenar. Esto es, los servicios disponibles en un momento dado y en un lugar, no pueden ser alma-

cenados para utilizarse posteriormente en otro lugar. Esta característica, aunada al aspecto de costos fijos, restringe de modo severo la flexibilidad del sistema para responder a las necesidades de transporte cambiante.

Existe un gran número de actividades que son difíciles de justificar cuantitativamente; y quizá porque éstas implican aspectos que no se relacionan a costos monetarios, no tienen valor desde el punto de vista estrictamente económico. Otros tienen valor económico y de costos, pero son de naturaleza cualitativa y están sujetos a evaluaciones subjetivas - que dependen del punto de vista del analista. Una herramienta interesante para la toma de decisiones que se ha desarrollado para resolver esta situación, es el análisis beneficio/costo. En este procedimiento se calcula el costo del proyecto; en seguida, los beneficios totales se estiman y finalmente se analiza la razón beneficio/costo. Si ésta es mayor de uno (si los beneficios exceden los costos), el proyecto se considera viable.

Esta estrategia de análisis beneficio/costo es básicamente de naturaleza heurística. Sus resultados deberán tomarse siempre con cuidado. El procedimiento es adecuado para comparar alternativas de naturaleza similar y para asignar prioridades; pero cuando se utiliza esta estrategia para analizar un proyecto aislado, sus resultados y conclusiones carecen prácticamente de valor. La razón de esta afirmación es que la estimación de los costos y beneficios involucra cálculos que requieren una evaluación subjetiva de los factores - no monetarios, para poder incluirlos en una evaluación mone-

taria cuantitativa. Cuando se comparan alternativas, por lo menos, se tiene la ventaja de utilizar reglas de decisión consistentes.

La asignación de precios involucra la selección del valor monetario que el usuario deberá pagar por el servicio de transporte. La asignación de precios requiere de una estrategia de decisión compleja e involucra también factores cualitativos; una parte importante de la asignación de precios es el efecto controlador para el cual está diseñada.

Existen tres tipos de estrategias de precios: 1) un impuesto fijo al usuario (por ejemplo, el impuesto por derecho de aeropuerto), 2) peaje constante (por ejemplo, un precio fijo por vehículo un puente o carretera de cuota) y 3) asignación de precios por costos marginales, en donde el nivel del precio varía según el congestionamiento y la cantidad de uso.

Existen situaciones especiales que justifican el uso de los primeros tipos de políticas de precios. Puesto que la mayoría de los sistemas de transporte sufren de problemas a causa de la gran diferencia entre el uso pico y el uso no pico, tal política de precios no ejerce ninguna influencia controladora. Por lo tanto, si se asignan precios más altos durante los periodos pico y más bajos durante los periodos no pico, la disparidad entre los dos usos tiende a decrecer o disminuir.

Una gran parte de los beneficios de transporte se distribuye a la población en general. Tales beneficios incluyen acceso a facilidades hospitalarias y clínicas, a empleos, a

centro comerciales, etc.

Para concluir esta sección de costos del transporte, es importante recordar que los costos y los beneficios son factores complejos. Debemos tomar un punto de vista amplio que reconozca la necesidad intrínseca de controlar un sistema con estrategias autorregulatorias y productivas.

3.2.4 Erróneos usos del concepto de velocidad.

En seguida, nos ocuparemos del concepto de velocidad el cual tiene una serie de interpretaciones erróneas relacionadas al problema general del transporte.

La velocidad puede definirse como la "tasa de movimiento" o la "magnitud de una velocidad independiente de la dirección".

1) La paradoja de la velocidad en el transporte: Quizá los aspectos más difíciles para entender el problema de velocidad son las realidades implícitas del mismo. Seguido, cuanto más rápido se trata de viajar, más rápido se hace posible cubrir distancias. Considérese la ecuación de la velocidad promedio.

$$s = vt$$

Manipulando términos tenemos:

este, así como otros
 Para conocer esta relación entre
 $t = \frac{s}{v}$
 los beneficios de los costos y los beneficios de los costos
 Por lo tanto, el tiempo (t) que se requerirá para via-
 jar una distancia fija (s) es inversamente proporcional a la
 velocidad (v). Si se duplica la velocidad se acorta el tiem-
 po a la mitad. Ahora agregemos un poco de complejidad al pro-
 blema. Representamos la distancia (s) como compuesta de un
 número de distancias (s_i), esto es:

$$s = \sum_{i=1}^N s_i$$

Similarmente,
 $t = \sum_{i=1}^N t_i$
 Por lo tanto,

$$t = \sum_{i=1}^N \frac{s_i}{v_i}$$

Supongamos por el momento que todos los tiempos son i-
 guales. Esto no es muy frecuente, pero servirá para ilustrar
 la situación. También supongamos que tomaremos un (t_k) en
 particular, para ver si podemos hacerlo más pequeño.

$$t = (N - 1) \frac{s}{v} + \frac{s_k}{v_k}$$

Nótese que (s) y (v) son las distancias y velocidades -

promedio para las (t_i) . Nótese que el valor de $n(s_k)$ es constante, pues no puede cambiar la distancia que se va a cubrir. Utilizaremos como ilustración los siguientes valores: $N = 10$; $s/v_k = 1$ hr; y $s_k = 100$ km. Si (v_k) es 100 km/hr, nuestro tiempo total de viaje son 10 horas. Ahora aceleremos las cosas un poco. Supóngase que (v_k) es 10 veces más rápido; o sea, 1 000 km/hr. El nuevo tiempo de viaje es:

$$\text{tiempo nuevo} = 9 + \frac{100 \text{ km/hr}}{1\,000 \text{ km/hr}} = 9.1 \text{ hrs}$$

Esto es interesante, pues se ha aumentado la velocidad del transporte por un factor de 10 y sólo se ha mejorado el tiempo total de viaje por un margen pequeño, 9%.

$$\% \text{ tiempo ahorrado} = \left(\frac{10 - 9.1}{10} \right) 100 = 9\%$$

El ejemplo anterior no es hipotético. No es ni siquiera raro; inclusive, ocurre tan seguido que se está convirtiendo en una verdadera paradoja para el transporte moderno. Esto acontece principalmente en viajes que requieren del uso de varios sistemas de transporte y en consecuencia de varios cambios de vehículo. El factor esencial que merece estudio para poder llegar a la solución del problema del tiempo real empleado en viajes, es la interconexión entre los medios de transporte. De nada valen los esfuerzos por diseñar e implementar sistemas de transporte más veloces, tales como los aviones supersónicos, si las interconexiones de este medio --

con otros son deficientes y lentas. (i) El problema del arranque/parada. Uno de los problemas más difíciles del transporte es el concepto "arranque/parada". Considérese el caso de un sistema de trenes rápidos con una velocidad máxima ($v_{\text{máx}}$). Se permite que el tren pare en estaciones con distancias de cierta separación de kilómetros. Se fija la aceleración y desaceleración a un valor constante de ($a_{\text{máx}}$).

El tiempo que el vehículo necesita para alcanzar la velocidad de operación ($v_{\text{máx}}$) es dado por:

$$t = \frac{v_{\text{máx}}}{a_{\text{máx}}}$$

Puesto que

$$v = a_{\text{máx}} t$$

se puede decir que la velocidad aumenta linealmente con el tiempo hasta llegar a la velocidad ($v_{\text{máx}}$). La distancia cubierta durante este periodo de tiempo es:

$$s = 1/2 a_{\text{máx}} t^2$$

Por lo tanto, la velocidad (en función de la distancia) es dada por:

$$v = \sqrt{2 a_{\text{máx}} s}$$

La ecuación anterior se presenta en forma de una gráfica en la figura 3.8. Ahora supongamos que alcanzamos la velocidad ($v_{\text{máx}}$) dentro de una distancia (s). Después de este momento nos vemos limitados en velocidad, hasta el momento que se disminuye la velocidad para la próxima parada. La situación se ilustra en la figura 3.9a. Por lo tanto, el viaje estaría compuesto de un número de secuencias de arranque/parada.

Es fácil visualizar que a medida que aumentamos la ($v_{\text{máx}}$) en la figura 3.9a, también se aumenta la velocidad promedio. Por lo tanto, el tiempo de viaje disminuirá, aunque no se podría aumentar la velocidad promedio por más que se quisiera. Como se ilustra en la figura 3.9b, para cualquier aumento de la velocidad sobre un valor crítico, el efecto en la velocidad promedio es cero. La causa de esto es que, puesto que la aceleración del vehículo es limitada, cualquier aumento en ($v_{\text{máx}}$) no tiene consecuencia, ya que tendremos que emplear todo el tiempo acelerando (con aceleración máxima) hasta la velocidad nominal y desacelerando el vehículo (con aceleración máxima negativa) para poder parar en las estaciones requeridas.

Para poder mejorar el sistema existen dos estrategias:-
1) aumento de la aceleración permisible máxima y 2) aumento entre la distancia de las paradas.

iii) El problema de interconexión: El problema de interconexión es un foco de atención para la aplicación de la Ingeniería de Sistemas. Para poder darle al problema una base, -

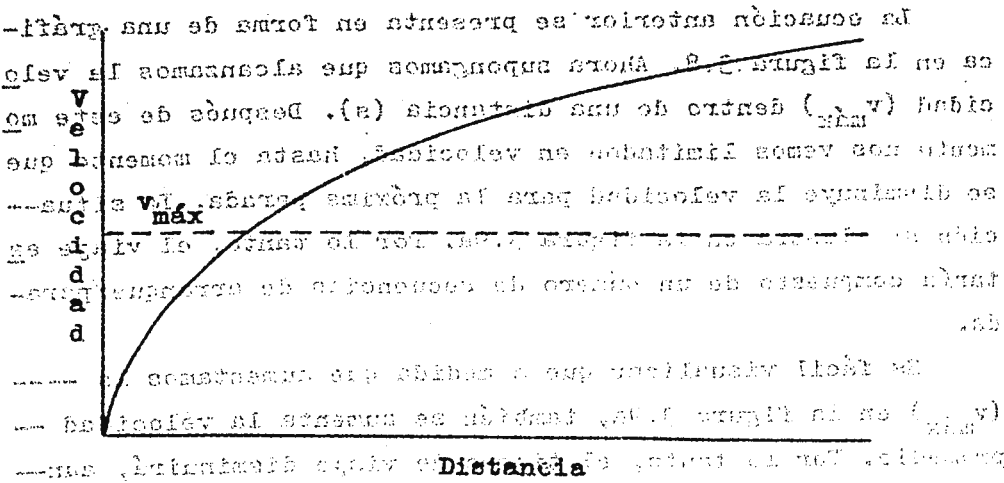


Fig. 3.8 Velocidad vs. distancia con aceleración constante.

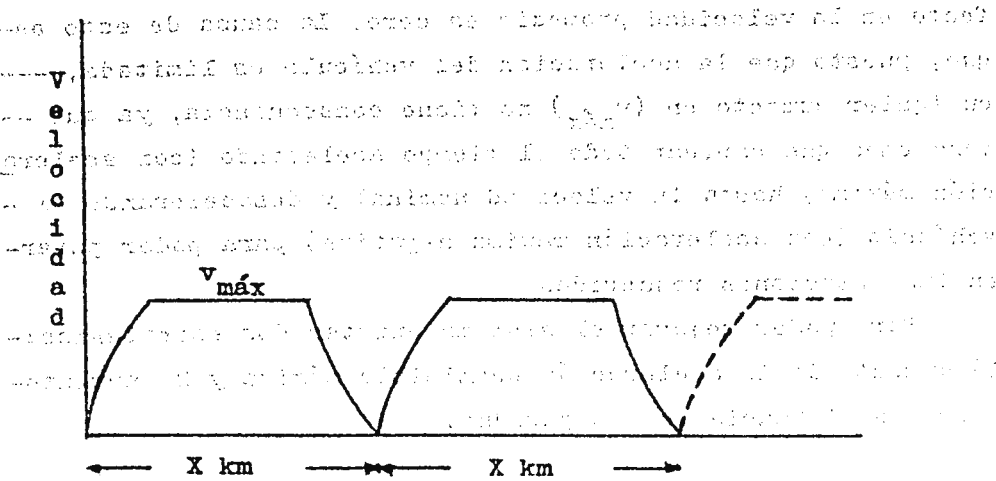


Fig. 3.9a Gráfica de velocidad vs. distancia para vehículos de tránsito masivo.

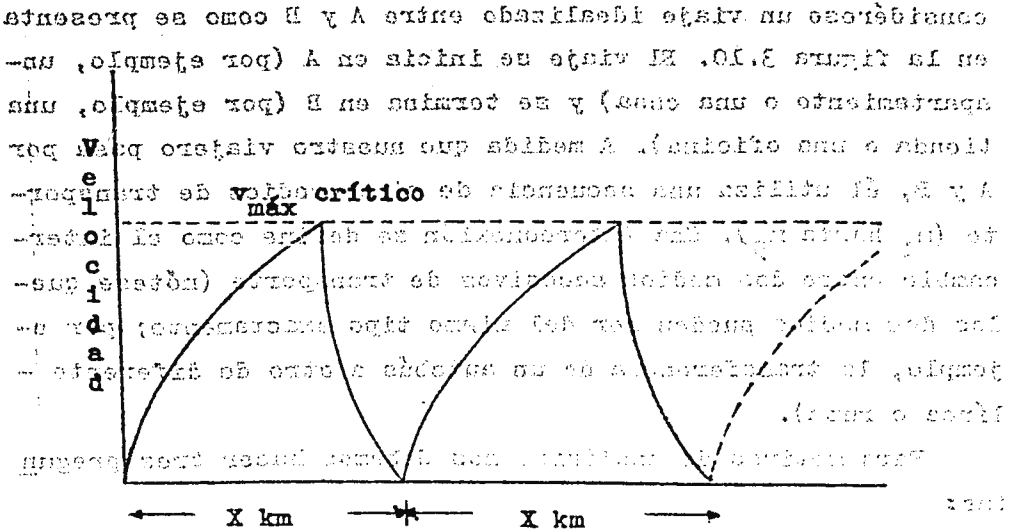


Fig. 3.9b Gráfica de velocidad vs. distancia para vehículos de tránsito masivo.

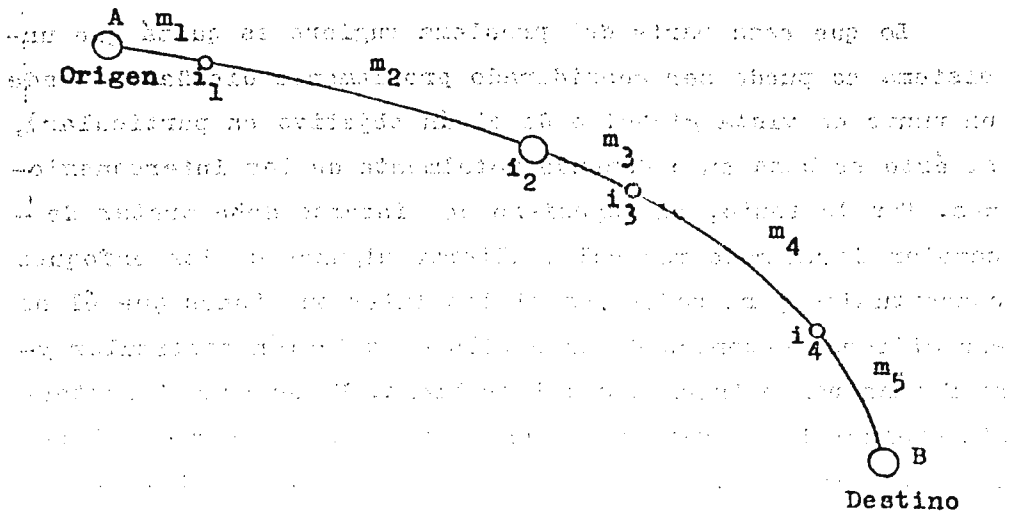


Fig. 3.10 Ilustración de un viaje de A a B de cuatro interconexiones y con cinco medios de transporte.

considérese un viaje idealizado entre A y B como se presenta en la figura 3.10. El viaje se inicia en A (por ejemplo, un apartamento o una casa) y se termina en B (por ejemplo, una tienda o una oficina). A medida que nuestro viajero pasa por A y B, él utiliza una secuencia de cinco medios de transporte (m_1 hasta m_5). Una interconexión se define como el intercambio entre dos medios sucesivos de transporte (nótese que los dos medios pueden ser del mismo tipo exactamente; por ejemplo, la transferencia de un autobús a otro de diferente línea o ruta).

Para motivos de análisis, nos debemos hacer tres preguntas:

1. ¿Deben existir las interconexiones?

Lo que esta parte del problema sugiere es quizá que un sistema no puede ser considerado propiamente diseñado (desde un punto de vista global o de algún objetivo en particular), si éste se basa en o depende totalmente de las interconexiones. Por lo tanto, el ingeniero de sistemas debe tratar de cambiar de un modo radical o alterar algunos de los enfoques conceptuales para poder ver si las interconexiones que él ha especificado dependen de un estilo de solución particular y no forman parte inherente del problema. Es de suma importancia evaluar la estrategia de análisis para reducir o eliminar estas interconexiones utilizando estas perspectivas.

2. ¿Cuál es la mejor localización de estas interconexiones?

El problema de localización de las interconexiones se puede analizar utilizando un modelo de redes que represente el sistema de transporte dentro de una área geográfica, examinaremos las suposiciones y parámetros de diseño para verificar la importancia de este concepto. Por ejemplo, una de las razones por la cual se ha utilizado el concepto de redes en la planeación del transporte urbano, es que el diseñador se ha visto forzado a aceptar que la mayoría de las personas generalmente tienen necesidad de hacer una gran variedad de tipos de viaje dentro de una área geográfica. Por medio de una estrategia apropiada de uso de tierra y planeación urbana, quizá algunas rutas puedan ser agrupadas para reducir la dispersión geográfica de esta red. Una vez que esta dispersión es adecuada, los patrones o configuraciones de la red de transporte saldrán a la vista, permitiendo el suministro del servicio con un alto grado de efectividad.

3. ¿Quién debe hacer la interconexión real, el viajero o el medio de transporte?

Este es sólo un aspecto del problema crucial del problema de interconexión. Es interesante porque implica hacernos preguntas que quizá nadie pensó antes. Es norma que al viajero le corresponda el trabajo de salir de un medio de transporte y entrar al siguiente. Supóngase que los dos medios físicamente se encargan de hacer esto para el viajero; ¿cuál -

beneficio se generaría? Es difícil concebir que esto sea posible de un instrumento mecánico. Pero supongamos que utilizamos una simple observación; el hombre puede intercambiar medios de transporte a velocidades no mayores a la velocidad de caminar del humano. Por otro lado, no existe un límite de la velocidad con que dos instrumentos mecánicos puedan hacer una interconexión. Esta es una gran ventaja; otras ventajas podrán ser la seguridad, la comodidad y la conveniencia.

Para terminar esta sección sobre el problema de las interconexiones debe enfatizarse que aunque la discusión se enfocó hacia el transporte de humanos, el problema de las interconexiones no está de ninguna forma limitado a este tipo. El problema más global incluye la interconexión de carga e información también.

3.3 DISEÑO DEL SISTEMA Y USOS DE LA TIERRA.

3.2.1 Modelación del flujo de vehículos.

La modelación del flujo de vehículos puede ser de dos tipos. El primer enfoque es el microscópico, el cual esencialmente presenta a cada vehículo como una serie de elementos individuales interactuantes. La segunda estrategia de modelación es de tipo macroscópico y es analógica al análisis-

de flujos continuos. Los resultados son finos, analogos a los que se obtienen en la modelación de fluidos.

1) Modelación micro: El enfoque microscópico para la modelación del flujo de vehículos toma el punto de vista de -- que cada vehículo es un subsistema y sus movimientos deben ser analizados por separado.

Considérese que el tráfico fluye en un carril y en una sola dirección y que la dirección positiva del flujo es el eje horizontal. Obsérvese que cada vehículo debe ajustar su velocidad (el único parámetro variable en este modelo) para tomar en cuenta la velocidad y posición de los otros vehículos adyacentes en el carril. Los ajustes se hacen para evitar colisiones con el vehículo, si el de enfrente disminuye su velocidad o para poder seguirlo si éste acelera.

Cada vehículo trata de mantener una velocidad normal denominada la "velocidad libre" (v_f). La influencia causal de condiciones externas al ambiente del vehículo se refleja en la reacción del piloto. Por lo tanto, la reacción del piloto en el tiempo ($t + T$) es función de los estímulos externos en el tiempo (t) (T es el tiempo de reacción del piloto). Supongamos que los vehículos se numeran en orden ascendente, que la posición del vehículo en el tiempo (t) se denomina $x_i(t)$, y que

$$x_i(t) < x_j(t); 1 > j$$

La posición del vehículo (n) puede ser relacionada a la

posición del vehículo enfrente de éste ($n-1$) con la siguiente relación:

$$\frac{d^2}{dt^2} x_n(t+T) = \lambda \frac{dx_{n-1}(t) - dx_n(t)}{dt}$$

donde λ es una constante. Integrando esta ecuación obtenemos:

$$\frac{dx_n(t+T)}{dt} = \lambda(x_{n-1}(t) - x_n(t)) + b$$

donde b es la constante de integración. Simplificando,

$$\frac{dx_n(t)}{dt} = \lambda \omega(t) + b$$

donde $\lambda = 1/T$ y la anchura del espacio entre los vehículos, es

$$\omega(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t) = 1/c_n$$

donde c es la concentración de los vehículos. Introduzcamos la velocidad v_n :

$$v_n(t) = \lambda \omega(t) + b$$

Se desea ahora obtener el valor de b . Considérese la condición de frontera cuando $v_n = 0$. Esto representa la condición de congestionamiento:

$$b = -\lambda \omega_n(t) = -\lambda \frac{1}{c_n}$$

y, por lo tanto:

$$v_n(t) = \lambda \omega_n(t) - \frac{\lambda}{c_n}$$

En el caso de condiciones normales:

$$v(t) = \lambda \omega(t) - \frac{\lambda}{c}$$

Combinando las dos últimas ecuaciones, obtenemos:

$$[v - v_n(t)] = \lambda \left[(\omega - \omega_n(t)) - \frac{1}{c} \left(1 - \frac{c}{c_n} \right) \right]$$

Supóngase que la concentración (c) es pequeña. Entonces:

$$c/c_n \ll 1$$

y la velocidad se acerca a la velocidad libre (v_f).

Una desventaja obvia de este modelo es que no se consideran ciertas restricciones físicas, tales como los límites de aceleración.

ii) Modelación macro: Para el estudio macroscópico del flujo de vehículos, consideremos una sección de una carretera como se ve en la figura 3.11.

En el caso donde no existen entradas de tráfico a lo largo de esta sección, la velocidad de flujo (q) es una función, sólo de la dimensión espacial (x); mientras que la concentración (c) es función del tiempo. Por lo tanto, el núme-

Y por lo tanto

$$\frac{\Delta}{\Delta t} = \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)_{II} = \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)_{II} v$$

de donde se deduce que

$$\frac{\Delta}{\Delta t} = (v)_{II} = (v)_{II}$$

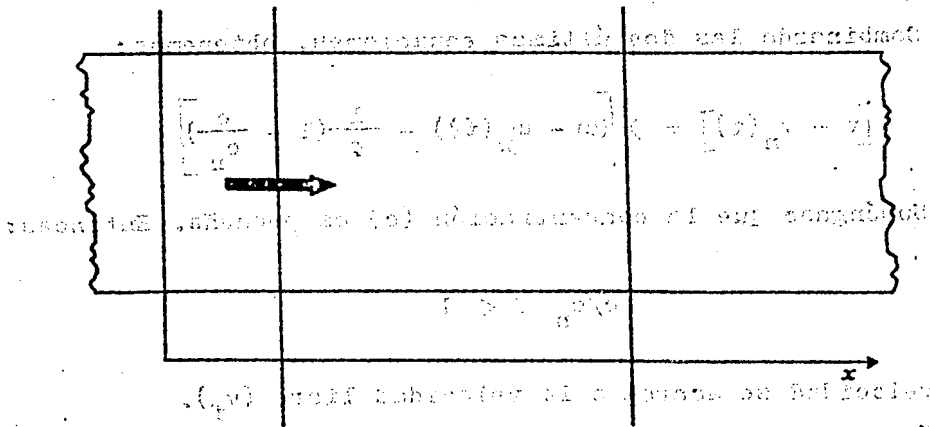


Fig. 3.11 Segmento unidimensional de una carretera.

En un instante cualquiera, se considera un elemento de longitud Δx situado entre x y $x + \Delta x$. Este elemento puede estar en reposo o moverse con una velocidad v . Si se considera un elemento de longitud Δx situado entre x y $x + \Delta x$, se puede observar que el elemento de longitud Δx se mueve con una velocidad v . Si se considera un elemento de longitud Δx situado entre x y $x + \Delta x$, se puede observar que el elemento de longitud Δx se mueve con una velocidad v .

ro de vehículos que cruzan el punto $(x + dx)$ es dado por:

$$n_{x+dx} = n_x + \frac{\partial n}{\partial x} dx \quad \text{o} \quad n_{x+dx} = q + \frac{\partial q}{\partial x} dx$$

donde

q = la velocidad de flujo de los vehículos en el punto (x) .

n_x = número de vehículos que cruzan el punto (x) en el intervalo de tiempo $(t + dt)$.

α = coeficiente paramétrico.

Por lo tanto:

$$q = \frac{dn}{dt} = \frac{\partial n}{\partial t} + v \frac{\partial n}{\partial x}$$

Supongamos

v = la velocidad promedio de los vehículos en el punto (x) .

c_t = la concentración de vehículos en el segmento (x) a $(x + dx)$ al instante de tiempo (t) .

Obsérvese que la concentración en el tiempo $(t + dt)$ se puede definir como:

$$c_{t+dt} = c_t + \frac{\partial c}{\partial t} dt$$

La velocidad promedio está relacionada con el flujo y la concentración por medio de la fórmula:

$$x \frac{dq}{dx} + q = x \frac{dc}{dt} + c \quad \text{o} \quad x \frac{dq}{dx} + q = x \frac{dc}{dt} + c$$

$$v = q/c \quad \text{o} \quad q = vc$$

si se

Si se utiliza un balance de masa del vehículo, se obtienen los siguientes resultados:

$$\left(\begin{array}{l} \text{el número de} \\ \text{vehículos en} \\ \text{el segmento.} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{el número de} \\ \text{vehículos dentro} \\ \text{del segmento.} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{el número de} \\ \text{vehículos fuera} \\ \text{del segmento.} \end{array} \right)$$

El número de vehículos en el tiempo (t) es dado por $c_t \cdot dx$. El número de vehículos en el tiempo $(t + dt)$ es dado por $(c_t + \frac{\partial c}{\partial t} dt)$. Por lo tanto, la acumulación neta de vehículos durante el periodo dado es:

$$(c_t + \frac{\partial c}{\partial t} dt) \cdot dx - c_t dx$$

El número de vehículos que entra a la sección de carretera durante el periodo de tiempo es: $q \cdot dt$, mientras que el número neto de vehículos que sale del segmento durante el mismo intervalo es: $(q + \frac{\partial q}{\partial x} dx) dt$.

La ecuación del número de vehículos en el segmento puede ahora describirse como:

$$(c + \frac{\partial c}{\partial t} dt) dx - c dx = dt - (q + \frac{\partial q}{\partial x} dx) dt$$

donde (t) representa c_t . Simplificando esta última para obtener la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

Para poder extender los resultados anteriores para que incluyan la posibilidad de nuevas fuentes (s) de flujos de vehículos (como resultado de una salida o entrada al segmento de carretera), la ecuación anterior se convierte en:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = s$$

Combinando esta ecuación y $q = vc$, se obtiene:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = 0$$

donde (v) puede interpretarse como una velocidad media (la velocidad de propagación) o la velocidad de onda cinemática.

3.3.2 La simulación de sistemas de transporte.

Lo único que falta para poder analizar problemas de transporte es poder resolver las ecuaciones del modelo presentado. Sin embargo, la solución analítica de estas ecuaciones no es tan simple como se quisiera. Resulta que las ecuaciones del modelo son simples, pero muchas; o pocas, pero --

complicadas. En ambos casos la solución por medio de cualquier estrategia directa es, por lo general, una tarea extremadamente difícil. Por lo tanto, se debe aplicar otro método para su solución.

$$Q = \frac{D_{10}}{X_{10}} + \frac{D_{20}}{X_{20}}$$

La simulación permite formular un modelo, especificar sus parámetros y seleccionar un conjunto de condiciones operativas (o de control), con valores numéricos de los parámetros para diferentes futuros de interés, sin necesariamente tener que gastar en una simulación o experimento físico del sistema. Si el modelo ha sido formulado utilizando parámetros que tienen un significado físico, una variación de estos parámetros permitiría analizar el comportamiento del sistema total.

La modelación y simulación de un sistema de transporte generalmente involucra cinco pasos:

1. Definición de los patrones de actividades.
2. La generación del viaje.
3. La planeación del viaje.
4. La desagregación del modelo.
5. La asignación del tráfico.

El primer paso requiere el estudio de la población (datos históricos, demografía, etc.), de factores económicos (nivel de empleo, ingreso, consumo, tenencia de vehículos, etc.), de usos de la tierra (fotogrametría, condiciones y aspectos legales, etc.); aspectos de transporte existentes (su percarreteras, tránsito público, tránsito privado, etc.) y -

de los patrones de movimiento de la población (lugar de residencia, y localización del empleo, patrones de compra y recreación, etc.). La generación del viaje es el procedimiento por medio del cual las preferencias o patrones de actividades se integran para producir un conjunto de viajes con orígenes y destinos. Esto se obtiene de: 1) las características de la población y del uso de la tierra; y 2) del uso de los estudios estadísticos para determinar cuántas personas terminan sus viajes, en qué zonas geográficas, con qué propósito y en dónde los inician.

La planeación de viajes en seguida conecta los orígenes y destinos para definir los viajes. Puesto que se tiene ya la demanda potencial de transporte, se pretende entonces especificar cómo debe hacerse cada viaje, lo que requiere la especificación de algunos otros elementos: la desagregación del modelo y la asignación del tráfico.

La desagregación del modelo es el proceso por medio del cual los viajes (obtenidos del paso anterior) se subdividen entre tránsito masivo y automóvil privado. Esta división se basa en características de preferencia y en el tráfico disponible.

El paso final en el proceso es la asignación de tráfico. Es en este momento en el que a cada vehículo se le asigna una ruta, incluyendo su origen y su destino; y cada viajero es asignado a un tipo de transporte específico.

A continuación se presenta un modelo de simulación utilizado en la actualidad por el "Bureau of Public Roads" en

E.B.U.U., para modelar el tráfico de automóviles. Los datos de entrada a este modelo son los orígenes del viaje y los destinos correspondientes. Las salidas del modelo (son el volumen de flujo para cada conexión y el tiempo asociado con el viaje.

Considérese la figura 3.12. Los nodos numerados representan orígenes o destinos de viaje. Los nodos no numerados son puntos intermedios. El número dentro de los círculos adyacentes a las rutas o interconexiones, se refiere al tiempo del viaje con velocidad libre e implica minutos. Los números en las cajas adyacentes a las mismas conexiones se refieren al número de viajes que conceptualmente comparten esta conexión. Estos representan las cargas reales (las cuales, por el momento, no están determinadas) que llevan las conexiones después de finalizar la simulación. El análisis es el que sigue: existen 50 viajes entre los nodos 1 y 2, 100 viajes entre los nodos 1 y 4, 200 viajes entre los nodos 1 y 3. La matriz origen-destino correspondiente se presenta en la figura 3.13 y tiene la misma interpretación de la figura 3.12.

En seguida se deberá determinar la correlación entre las cargas y el tiempo de viaje en una interconexión. Basado en observaciones empíricas y otros factores, el tiempo del viaje real de una conexión se relaciona al tiempo del viaje con velocidad libre como sigue:

$$\frac{T_a}{T_0} = 1.0 + 0.15(V_a/c_p)$$

donde

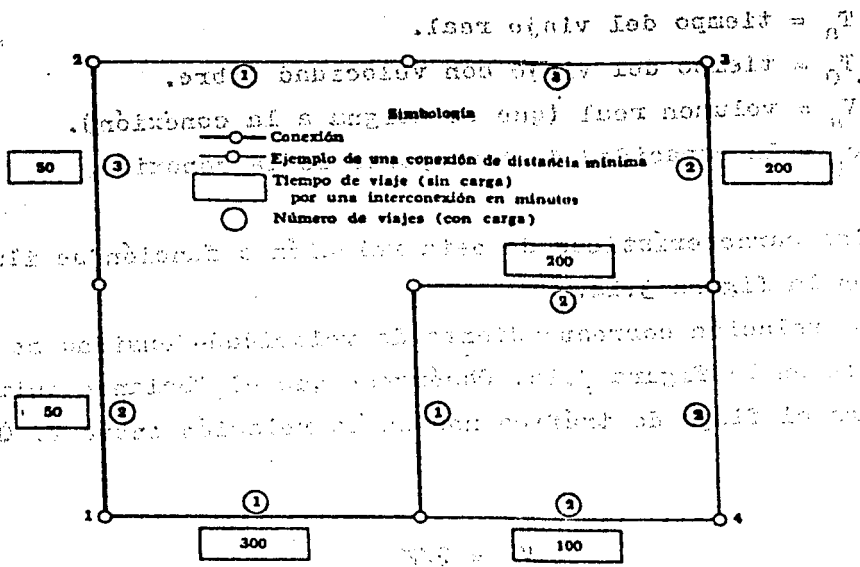


Fig. 3.12 Una red de carreteras indicando el tiempo de viaje en cada interconexión y cargas.

Origen \ Destino	1	2	3	4
1	○	50	100	100
2		○		●
3		●	○	●
4		●		○

Fig. 3.13 Matriz origen- destino para la fig. 3.12

T_a = tiempo del viaje real.

T_0 = tiempo del viaje con velocidad libre.

V_a = volumen real (que se asigna a la conexión).

c_p = la capacidad de transporte de la conexión.

Las características de esta relación o función se ilustran en la figura 3.14.

La relación correspondiente de velocidad-densidad se presenta en la figura 3.15. Obsérvese que el "balance de masa" para el flujo de tráfico nos da la relación entre V_a , Q y K :

$$V_a = Q/K$$

Esta relación se describe en la figura 3.16; la figura 3.17 presenta las curvas de velocidad constante y de separación de vehículos constante en función de Q y K .

El "Bureau of Public Roads" de los E.E.U.U. requiere la siguiente secuencia de pasos:

1. Se asigna el valor $V_a/c_p = 1$ para todas las conexiones (esta es la condición inicial).
2. Se calculan los T_a (para V_a/c_p) de todas las conexiones, utilizando la ecuación de T_a/T_0 .
3. Se calculan las rutas de tiempo mínimo; esto se hace generalmente por medio de una búsqueda exhaustiva. Nótese que debemos utilizar los tiempos T_a reales.
4. Utilizando la matriz origen-destino, se asignan viajes pa

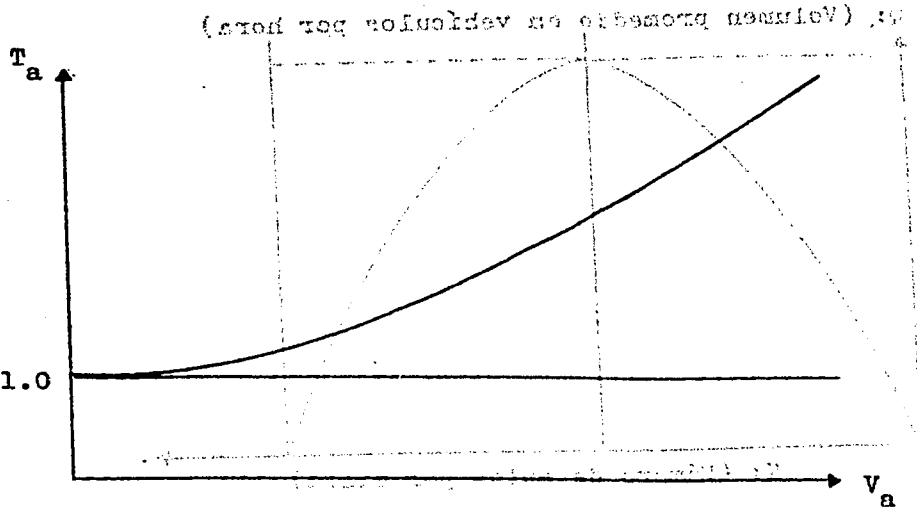


Fig. 3.14 Tiempo de viaje real en una interconexión en función de la carga de tráfico o volumen de flujo.

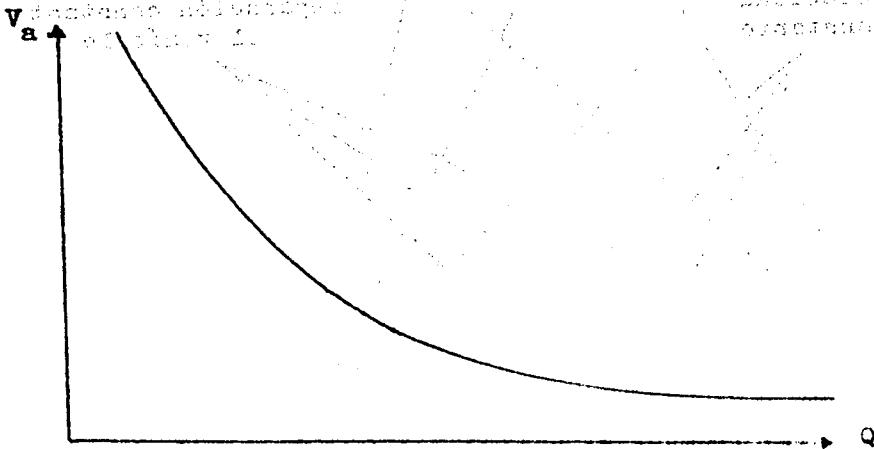
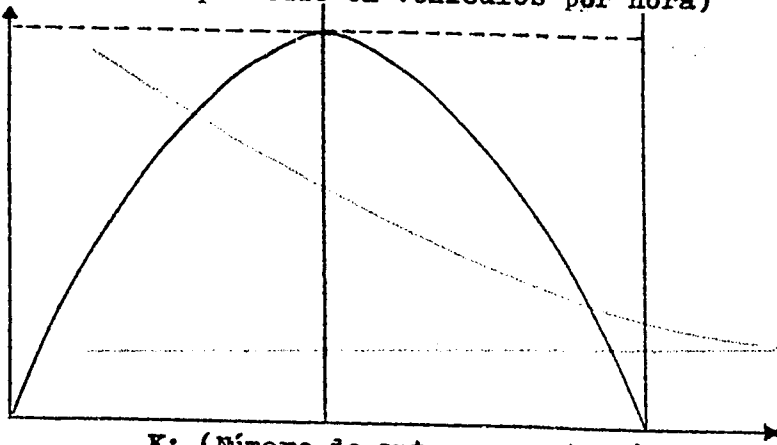


Fig. 3.15 Velocidad versus densidad promedio.

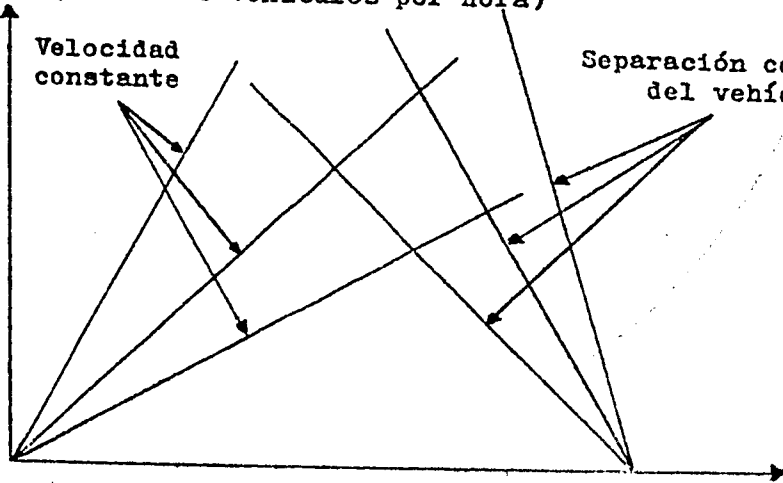
Q: (Volumen promedio en vehículos por hora)



K: (Número de autos por milla)

Fig. 3.16

Q: (Número de vehículos por hora)



K: (Número de autos por milla)

Fig. 3.17

- ... en las rutas de tiempo mínimo (esto resulta en nuevos V_a para cada conexión). El procedimiento se repite hasta que se alcanza un estado estable.
5. Se calculan nuevos valores de V_a/c_p para cada conexión, utilizando el V_a obtenido en el paso 4. El procedimiento se repite hasta que se alcanza un estado estable.
 6. Se repiten los pasos 2 a 5 tres veces, y se promedian los cuatro V_a para cada conexión, obteniendo así una velocidad promedio de V_a .
 7. Se calcula T_a para cada conexión utilizando la ecuación de T_a/T_0 y los valores V_a del paso 6.

Este procedimiento redundante en la asignación de viajes de automóvil a una red de transporte, lo que permite a los diseñadores y planificadores determinar los efectos de cambio en los parámetros principales: la capacidad práctica de la carretera y el tiempo del viaje con velocidad libre. Las alteraciones físicas en la localización de semáforos, carriles adicionales de tránsito, límites de velocidad, adiciones de túneles y puentes, restricciones de acceso, etc., contribuyen al valor y comportamiento de los parámetros c_p y T_0 . Sin embargo, la relación cuantitativa entre las variables físicas y los parámetros es bastante débil. Generalmente la definición de esta relación se basa en experiencia o intuición.

El ejemplo anterior es sólo un método para la asignación de flujos de tráfico. Generalmente se prefieren modelos que pueden generar cierta información sobre la reacción dinámica del sistema. De esta forma el efecto de cambios y perturbaciones temporales a corto plazo podrá ser evaluado. Es-

to es de especial importancia, puesto que estas variaciones pueden ser significativamente diferentes de los valores promedio.

El diseño de sistemas de transporte, en la actualidad, estudia la sensibilidad del sistema a cambios en los valores de ciertos parámetros. Por ejemplo, en algunas ciudades se han instalado tanto señales de alto como de tráfico en el mismo sitio. Las reglas de tránsito por lo general implican que el control más activo o permanente sea el obedecer. Por lo tanto, en el caso de una falla eléctrica que inutilice las luces de tránsito, la señal de alto establece las direcciones de preferencia y el derecho de circulación.

3.3.3 El concepto del control.

El concepto del control es una parte esencial e importante de los sistemas de transporte, pues permite que los diferentes componentes del sistema funcionen en armonía. Las formas y estrategias del control son de diferentes tipos, desde el control del consumo de combustible en un sistema de inyección para una máquina de combustión interna, hasta el manejo eficiente del uso de la tierra.

Existen varios conceptos de control de sistemas de transporte: el control de componentes, el control del vehículo y su automatización, y el control dentro de la planeación urbana.

La mayoría de los éxitos recientes han sido en el área de control de componentes del vehículo.

Es interesante notar que una de las desventajas de la incorporación de instrumentos de control ha sido la falta de sensores baratos y seguros, aunque con la cada vez mayor atención dirigida hacia este tema, se ve ya en la actualidad un incremento en el número de instrumentos y sensores disponibles para sistemas de control. Esto es de especial importancia para la detección temprana de posibles fallas en los componentes.

Por otra parte, los sistemas de control de vehículos se diseñan en la actualidad para una gran variedad de usos. Un ejemplo es el control automático de vehículos para evitar colisiones durante su operación (como en el caso de la mayoría de los aviones comerciales de hoy en día). Se han desarrollado ya sistemas automáticos de transporte terrestre (sin chofer). También están en pleno uso los sistemas para el control automático de aterrizaje de aviones en aeropuertos; en este caso los subsistemas terrestres envían información sobre la localización final deseada del vehículo y su trayectoria. Un sistema de control dentro del vehículo se hace responsable de todas las instrucciones posteriores. Para evitar fallas, debemos eventualmente integrar los controles de todos los vehículos. Esto nos permite el uso óptimo de los energéticos, así como la aplicación de estrategias para evitar los efectos con frecuencia catastróficos de un mal funcionamiento o fallas mecánicas.

Por otro lado, el control de semáforos en una ciudad es

una tarea compleja. Aun para intersecciones simples, el detalle requerido para un control eficiente es extenso. Consideremos el caso de una intersección simple (ver la figura 3.18). En esta situación simplificada debemos decidir sobre una política a través de la cual determinemos el periodo de tiempo que cada luz (de cualquier color) en cada intersección debe estar prendida o apagada. La estrategia de control determina qué luces están, en qué estado y cuándo. Nótese que este objetivo de control general impone ciertas restricciones a priori sobre la operación de señales de tránsito. Por lo general, la estrategia de control es tal que los semáforos norte-sur se operan simultáneamente y las luces este-oeste se sincronizan también. Por lo tanto, los únicos dos parámetros de control son el tiempo del ciclo y la mezcla. El tiempo del ciclo es la duración del periodo de tiempo entre un verde (o cualquier otro color) en una intersección en particular y el siguiente verde (u otro color) del mismo semáforo.

Para poder controlar el tránsito adecuadamente, todas las intersecciones de una área deben estar controladas de igual manera. Las redes de semáforos se controlan utilizando con exactitud los mismos parámetros de control que en el caso de una intersección sencilla, con una importante adición; la programación de fases. Por medio de una selección apropiada de las fases se podría permitir el flujo de tránsito en una dirección a través de toda una zona urbana sin interrupción. Infortunadamente, la dirección opuesta de flujo de tránsito por lo general tendría que ser interrumpida con fre

una de las secciones de la red de transporte de la zona de estudio para la realización de un estudio de tráfico.

El estudio de tráfico se realiza en las secciones de la red de transporte de la zona de estudio para la realización de un estudio de tráfico.

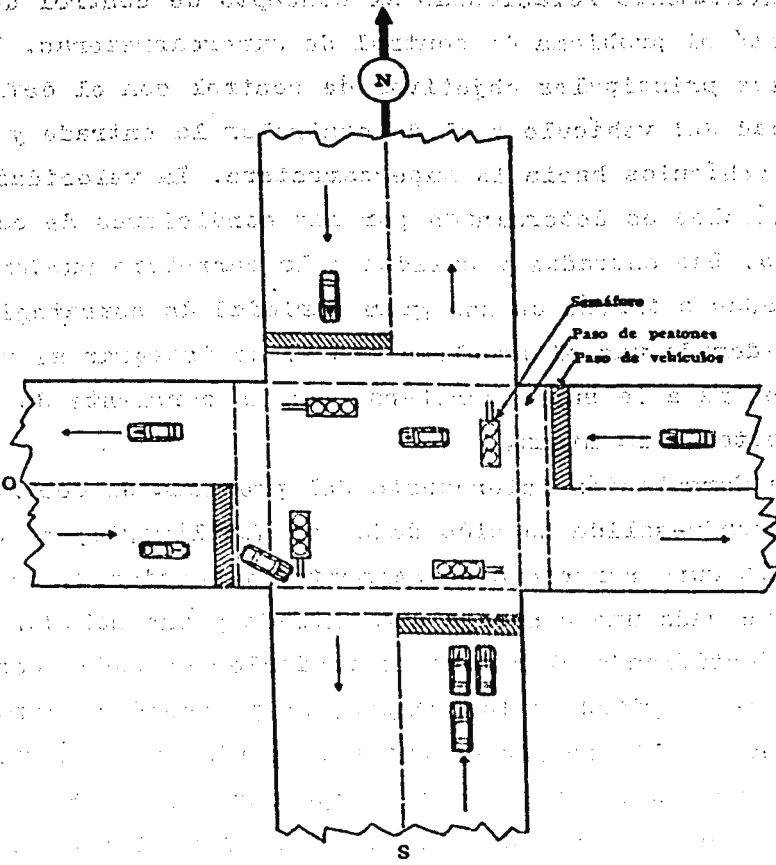


Fig. 3.18 Una intersección típica.

cuencia. Una forma de reducir este problema es la de dar — prioridad direccional en ciertas zonas.

Intimamente relacionado al concepto de control de tránsito está el problema de control de supercarreteras. En este caso, los principales objetivos de control son el definir la velocidad del vehículo y el de controlar la entrada y salida de los vehículos hacia la supercarretera. La velocidad de — los vehículos es determinada por las condiciones de carga y descarga. Las entradas y salidas a la carretera pueden ser — controladas a través de una gran variedad de estrategias. Se ha considerado que el problema era el de integrar al vehículo que entra a la supercarretera, con la corriente de flujo de tránsito de la misma.

Una formulación interesante del problema de control de rampa entrada-salida ha sido dada por Wattleworth, el cual — dividió la supercarretera en segmentos y secciones, de tal — forma, que cada uno contenga una entrada y una salida. Ha— biendo identificado el número de vehículos en cada sección y conocida la longitud de las rampas, se procedió a contar los automóviles de las rampas de entrada, minimizando el tiempo total de viaje a lo largo de las supercarreteras. El problema se formuló como un modelo de programación lineal y se resolvió por medio del método simplex.

La siguiente área de aplicación del concepto de control es la automatización. Los dos aspectos básicos de este problema son: 1) la estructuración (u operación) del sistema, y 2) la programación y fijación de rutas.

En la mayoría de los casos, los aspectos de automatiza-

ción de sistemas de transporte se han utilizado infrecuentemente. La estructura de los sistemas de respuesta automática es en realidad simple. En contraste a los esquemas de tránsito de la actualidad, los sistemas de reacción automática están diseñados para el usuario, a fin de reducir su tiempo y para mejorar las rutas.

Finalmente, tenemos la aplicación de los conceptos de control a la planeación urbana. Aquí la densidad de usos específicos, la asignación de áreas abiertas y planeación geométrica son diseñadas para poder dar movilidad sin tener que depender del movimiento. Las herramientas básicas aquí son las especificaciones de geometría urbana y la distribución del uso de la tierra. La planeación del uso de la tierra y los sistemas de transporte representan un importante papel complementario: 1) el uso de la tierra representa una restricción básica para el suministro del transporte, y 2) el transporte determina los patrones para el uso de la tierra.

3.3.4 Los factores humanos.

El diseño de factores humanos simplemente es un aspecto del proceso de diseño que permite la creación de un sistema para que éste pueda satisfacer las limitaciones y expectativas físicas, psicológicas y estéticas del hombre. Un beneficio inmediato del enfoque de factores humanos han sido las ventajas filosóficas del concepto de asegurar que las máqui-

nas se adaptan al hombre y no a la inversa. Se ha obtenido gran éxito en el área antropométrica. Las dimensiones físicas, reacciones y requerimientos se han estado midiendo e incluyendo en muchos sistemas diseñados anatómicamente. Además, se han hecho investigaciones profundas en algunos otros aspectos colaterales.

La lista de componentes en el diseño de factores humanos incluye lo siguiente:

1. Factores antropométricos (mediciones y aspectos físicos) - (ver la figura 3.19).
2. Factores psicológicos (proveer el bienestar social).
3. Factores sociológicos (integrar a la gente en una forma productiva, segura y satisfactoria).
4. Factores estéticos (atender a los sentidos de tacto, oído, vista y olfato para integrar el ambiente).

Para ser más específicos, considérese el diseño de factores humanos de los sistemas de transporte como sigue:

AMBIENTE INTERNO (interior de un vehículo).

- Velocidad, aceleración y vibración.
- Ruido.
- Iluminación.
- Calidad atmosférica, temperatura y humedad.
- Olor, asignación de espacio.
- Estética-color, limpieza y atractivo visual.

El factor humano

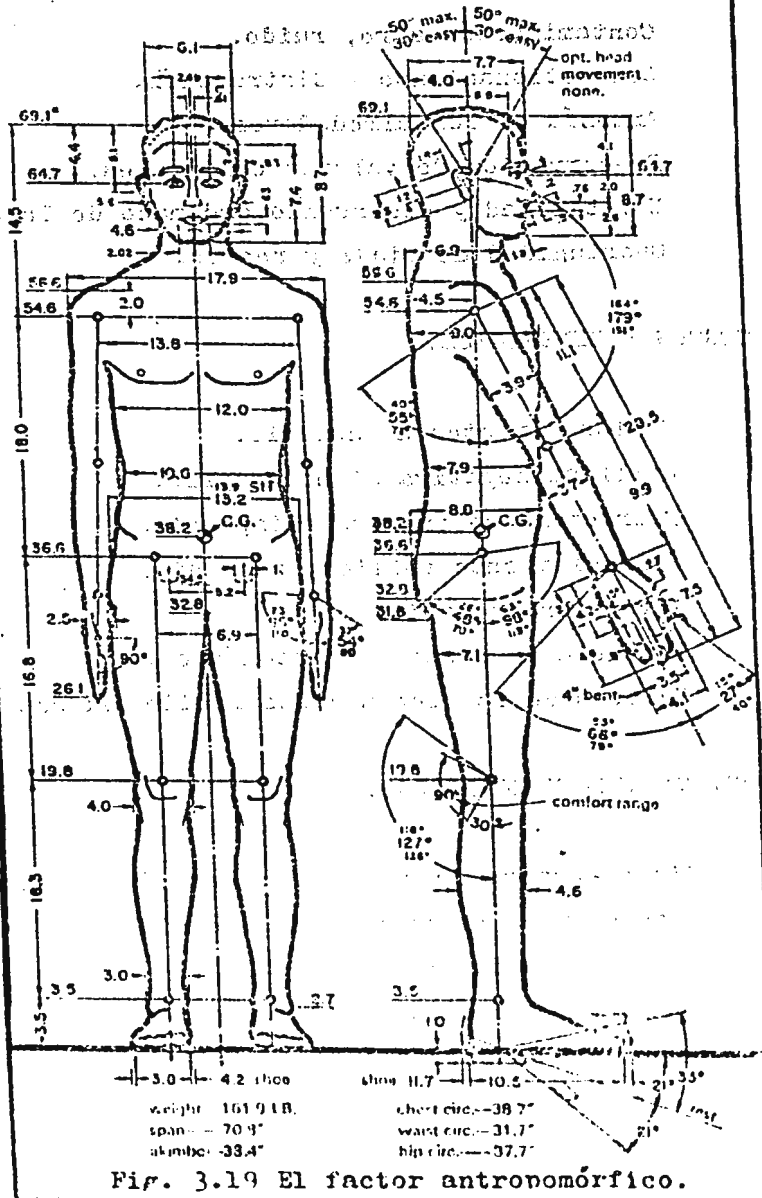


Fig. 3.19 El factor antropomórfico.

AMBIENTE EXTERNO.

TORREÓN DEL
GOBIERNO

- Contaminación-aire, ruido.
- Congestionamiento y distracción.
- Armonía de los alrededores.
- Preservación de valores culturales.
- Estabilidad y desarrollo ordenado de la comunidad.
- Oportunidad de viaje y recreo.

COSTOS Y BENEFICIOS.

- Costos directos al usuario.
- Utilidad negativa al no usuario.
- Estructura de ingreso e impuestos.
- Financiamiento público, subsidio.
- Inversión de capital.
- Potencia de desarrollo económico.
- Valores de la tierra y desarrollo urbano.

CONVENIENCIA Y MOVILIDAD.

- Tiempo-espera de caminar de estacionamiento, movimiento.
- Intersistema de transporte, terminales, conexiones entre redes de transporte.
- Operación-disponibilidad y frecuencia del servicio.
- Seguridad de servicio, accesibilidad, compatibilidad de llegada-salida.
- Información comprensible; señales y mensajes relaciona-

---ova dosha la asignación de rutas, horarios, localizacio--
 de obnes, identificación de los vehículos. según los obnes
 Señales especiales para enfermos, lisiados, niños, adul-
 tos, edad avanzada, inválidos, etc. según el obne
 Riesgos de accidentes-reales y percibidos y según el obne
 Facilidades de emergencia. según el obne
 Crímenes y desórdenes-reales y percibidos.
 Iluminación, protección, área no conocida, presencia de
 otros, salud-intoxicantes atmosféricos, salinidad.

INTERACCION SOCIAL.

Agrupamientos deseables e indeseables, confrontaciones.
 Libertad de seleccionar acompañantes de viaje.
 Espacio individual, privacidad.
 Satisfacción de objetivos de viaje.
 Opiniones de grupo de referencia.

ESTADO PSICOLOGICO.

Aburrimiento.
 Autoestima.
 Percepción de seguridad, alarma y miedo.
 Ansiedad e incertidumbre, frustración.
 Sentido de control personal.
 Confort y calidad del transporte.
 Espectativas personales.

Estos factores se integran al sistema de diseño, evaluando los tipos de reacciones que se esperan del usuario para poder atender sus necesidades humanas. Aunque no existen todavía modelos generalizados, mucho se ha aprendido en los últimos años y actualmente esta área recibe las inquietudes de investigadores de gran variedad de disciplinas.

3.3.5. La planeación del uso de la tierra.

Un aspecto importante del problema de transporte es la planeación del uso de la tierra.

La planeación del uso de la tierra implica un importante concepto de sistemas; esto es, si un modelo o formulación de cierto problema aparentemente no tiene solución, quizá otra formulación la tenga.

Lo que sucede con el problema de transporte es que es demasiado difícil para ser resuelto en la forma en que ha sido planteado. En particular, parece no haber ninguna solución efectiva para el problema de transporte de una población urbana cuando no se definen las restricciones de la geometría del sistema. Simplemente no es posible proveer transporte a todos, en todo momento y en todas direcciones. Por lo tanto, modificamos el problema agregando los puntos de origen, los destinos y reduciendo la necesidad de movimiento, para así poder tener movilidad. Hacemos todo esto geométricamente, prescribiendo los patrones del uso de la tierra; esto

es; lo que llamamos la planeación del uso de la tierra.

Una de las herramientas básicas para la planeación del uso de la tierra es la zonificación; esto es, ciertas superficies de tierra se restringen para utilizarse en determinada forma, otras ciertas superficies no se podrán utilizar, etc. La zonificación es una técnica ineficaz, a menos que se combine con una estrategia consistente en el uso de la tierra.

La planeación del uso de la tierra es un proceso complejo y altamente sofisticado que requiere gran cuidado en su aplicación. Este concepto implica la especificación de los tipos de desarrollo que se harán realidad, sobre qué superficie de tierra, para qué propósito y en qué magnitud; incluye aspectos tan diversos como la condición de la superficie de tierra (esto es bosque natural, superficie de cemento, terreno desmontado, etc.) y la densidad de población que la región puede soportar en términos físicos, de salud psicológica y bienestar en general. Por consiguiente, la planeación del uso de la tierra es simplemente la estrategia de planear el mejor uso futuro de la misma.

Para que una planeación del uso de la tierra tenga éxito se requiere considerar dos aspectos fundamentales: el área geográfica de interés debe ser lo suficientemente grande, y los planes y programas tienen que incluir consideraciones a largo plazo. Si no se incluyen estos dos factores, ningún plan coordinado de desarrollo, movilidad y servicio municipal puede ser efectivo. Más específicamente, el área geográfica requiere ser un distrito funcional independiente. Si --

dos ciudades vecinas interactúan de modo directo y comparten servicios, problemas y población, éstas se podrían considerar como parte del mismo distrito de planeación. Sin embargo, aquí se debe tener cuidado con este concepto, pues con argumentos sencillos y generalizados pudiéramos implicar que las regiones debieran hacerse más grandes aún, hasta llegar a considerar las fronteras nacionales o físicas como los únicos factores limitantes.

El segundo aspecto de la planeación es el tiempo. Existen muchas razones del porqué es conveniente basar cualquier plan en un marco de tiempo amplio. Si tales planes incluyen construcción o producción, entre mayor tiempo se asigna para las actividades propias de construcción y producción, menor será la presión y demanda de las facilidades existentes. Además, la asignación de tiempo permite la inclusión de efectos de retroalimentación naturales.

El horizonte de planeación es función directa de la complejidad del proyecto, del estado inicial de su ambiente o recursos disponibles, etc., y es por esto que es común aplicar planes, tanto de cinco años como de diez, veinticinco y otros. Todos estos programas tienen metas específicas y secuencias de decisión, y tienen algo en común: están estructurados alrededor de la necesidad de facilitar el tiempo suficiente para el logro de una meta específica.

La planeación del uso de la tierra requiere considerar el factor tiempo en una forma drásticamente diferente. Para hacer efectiva esta estrategia, deberá reconocerse la naturaleza básica del ser humano y su ambiente. Un ingrediente e--

encial e importante es la naturaleza dinámica de las interacciones y procesos; esto es, cada acción y cada efecto responde en influencias que varían en tiempo y que aunque algunas veces se neutralizan, con frecuencia se combinan en forma complementaria para producir reacciones drásticas a influencias o factores aparentemente insignificantes. Lo importante aquí es reconocer que tales variaciones dinámicas son la regla y no la excepción. Por lo tanto, el horizonte de planeación deberá ser tal que permita considerar el tiempo necesario para que el sistema reaccione a estos elementos que se introducen al ambiente.

Para poder hablar sobre cómo calcular la dimensión del horizonte de planeación, es necesario introducir la noción de "equilibrio" en un proceso dinámico. El equilibrio de este proceso es la condición en la que los cambios internos -- causados por influencias externas (que ocurrieron en el pasado, pero que son constantes ahora) han desaparecido. Esto no quiere decir que haya desaparecido toda actividad, pero sí implica que todos los elementos internos del sistema han regresado a su estado común anterior a una influencia externa.

Veamos ahora el ejemplo de la ampliación de un camino existente. Después de un tiempo el tráfico, así como los patrones económicos y sociales, se reajustan a este cambio y dejan de fluctuar. Como se podrá ver, el horizonte de planeación del uso de la tierra debe permitir que se alcance el equilibrio. Aún más importante, los planes deben formularse de tal manera que el nuevo estado de equilibrio sea realmente un estado estable. Esto es, después de la imposición de

las modificaciones planeadas, el sistema debe ser capaz de operar con un equilibrio, por lo que tales planes deben considerar el efecto total de cambio y deben permitir e indicar las modificaciones que el sistema requiere para que pueda operar continuamente.

Por otro lado, con frecuencia se ve la aparente necesidad, por parte de los planificadores del uso de la tierra, de establecer de una vez por todas un plan maestro único. Esto es una interpretación falsa del concepto. Aunque es necesario planificar para que la nueva modificación permita al sistema alcanzar un equilibrio y aunque éste deberá ser capaz de existir permanentemente, no se debe de un modo necesario considerar el mantener ese mismo equilibrio para siempre, por lo que cualquier modificación de los patrones del uso de la tierra existentes, deberá considerar la planeación de un nuevo equilibrio para el sistema. La implementación de ese nuevo plan involucra la transición de un equilibrio a otro.

3.3.6 Las interrelaciones de los sistemas de transporte y el uso de la tierra.

El transporte es un parámetro causal en relación al uso de la tierra. Un caso ilustrativo del desarrollo del uso de la tierra lo proporciona la construcción de carreteras. Antes de la existencia de esta vía de comunicación, los terrenos situados entre las poblaciones que van a ser comunicadas

son ocupados para el pastoreo y la siembra o simplemente carecen de uso específico y racional. Una vez concluida la obra, la carretera origina el establecimiento de asentamientos humanos a lo largo del camino y es así como podemos encontrar viviendas, gasolineras, vulcanizadoras, talleres mecánicos y eléctricos, centros comerciales y demás en sitios donde no existían, modificando radicalmente el uso de la tierra de las zonas aledañas a la carretera e incluso modificando las actividades de las poblaciones de la región afectada. Así, si en un principio cierta comunidad se dedica a la agricultura por ejemplo, con la construcción de la carretera puede convertirse en una comunidad comercial o industrial alterando el uso original de la tierra de tal conglomerado.

Un análisis del impacto ambiental del transporte deberá necesariamente considerar la interacción entre el uso de la tierra y el transporte. Los sistemas de transporte han sido planeados de modo provisional en respuesta a las demandas de viaje creadas por el desarrollo de una zona. Por lo tanto, el proceso recíproco por medio del cual el uso de la tierra afecta el viajar y por medio del cual las facilidades del transporte afectan el uso de la tierra, se ha mantenido en gran parte sin identificar.

El impacto del transporte en el uso de la tierra es diverso y complicado. Existen dos hipótesis relacionadas al papel del transporte. Una considera que el transporte reacciona al desarrollo del uso de la tierra y que, por lo tanto, su planeación deberá servir al desarrollo futuro de la tierra. Un punto de vista complementario es que el transporte -

afecta los patrones de desarrollo y las actividades del uso de la tierra y, por lo tanto, deberá ser diseñado para alcanzar objetivos socialmente meritorios.

Puesto que no existe una autoridad de zonificación regional, en la mayoría de los casos, se pueden recomendar varias estrategias para implementar una política que restrinja aquella utilización de la tierra que genere impactos adversos de transporte. Se sugiere que quizá las reglas y restricciones ambientales deben controlar la utilización de la tierra para facilitar una planeación integral de su uso, compatible con los sistemas de transporte.

Los sistemas de transporte, por otra parte, también afectan los patrones sociales directamente. En el pasado éstos han funcionado con el objeto de mejorar el acceso geográfico entre dos localidades y, por lo tanto, para promover el desarrollo económico. El papel del desarrollo estaba limitado por el transporte de bienes y mano de obra. Hoy en día el transporte debe reconocer una nueva función: mejorar el acceso de una gente con otra. El transporte debe servir tanto como un medio de comunicación como para promover el desarrollo humano.

La falta de una política de transporte definida y el énfasis concurrente en la construcción de vías de carreteras han redundado en una serie de implicaciones sociales no necesariamente positivas. El impacto de los sistemas de autopistas ha significado una gran desventaja para las personas de escasos recursos y para los que no tienen automóviles en la ciudad. La proliferación de autopistas ha contribuido a la

degradación de los sistemas de tránsito urbano, los cuales son la base del transporte para estos últimos grupos. El ciclo de vida de un sistema de tránsito generalmente tiene las siguientes características:

1. Un aumento en la construcción de carreteras, lo que estimula el uso del vehículo privado y no el transporte colectivo.
2. Un aumento en las tarifas del transporte en un intento de compensación por el bajo número de viajeros.
3. Un uso incrementado del vehículo privado a causa de tarifas más altas.
4. Una reducción del número de servicios en respuesta a un uso decreciente.
5. Todavía un mayor aumento en las tarifas y reducciones en el número de patrocinadores.

La culminación de los efectos adversos generados por un programa de inversiones en carreteras no balanceado es el problema urbano generalizado de las principales ciudades grandes del mundo actual.

Si bien hemos puesto especial interés en la planeación de usos de la tierra en áreas urbanas y en carreteras, esto no quiere decir que tal planeación no sea aplicable a los demás sistemas de transporte o que sólo debe emplearse en sistemas de transporte terrestres. Lo que sucede es que en este tipo de sistemas el problema de la planeación del uso de la tierra es más palpable y urgente, ya que en tanto sistemas -

como el portuario y el aeroportuario pueden diseñarse y planearse para construirse en los lugares donde sea conveniente, las ciudades están ya construidas y demandan soluciones inmediatas.

La necesidad de planear el uso de la tierra en el diseño de una vía ferroviaria es también importante, siendo este caso enteramente similar al de carreteras. Cuando se piensa construir un puerto, se debe tener presente que se requerirán terrenos para las instalaciones portuarias tales como almacenes, zonas para carga y descarga de los buques, caminos de acceso, oficinas, sitios para colocar equipo, etc.; lo cual implica darle a la tierra un uso diferente al anterior.

Un aeropuerto requiere también de grandes extensiones para sus instalaciones (edificio terminal, pistas, plataformas, hangares, bodegas, estacionamientos, hoteles y otros servicios) que necesariamente modifican el uso de la tierra de la región en la que se localizan.

Por lo tanto, siempre que se diseñe un sistema de transporte deberá llevarse a cabo la planeación integral del uso de la tierra de la zona que será afectada.

Por otro lado, existen severos problemas asociados con los sistemas de transporte en la actualidad, lo que requiere de una revalidación renovadora de políticas y prioridades. El congestionamiento de las vías, los problemas de seguridad que causan muertes en las mismas, la resistencia del ciudadano hacia la continua construcción de carreteras que cruzan las zonas urbanas y de aeropuertos, la contaminación de la atmósfera, la degradación de los sistemas de transporte pú-

blico y la falta de transporte para el que no maneja automóvil, la insuficiente coordinación de los diferentes medios de transporte y otros, son problemas de transporte a nivel nacional y mundial.

Hasta la fecha, el diseño de sistemas en la planeación del transporte se ha limitado a un concepto muy restringido de eficiencia, que no toma en cuenta los efectos de los cambios de transporte en un ambiente más amplio, urbano y social. Por ejemplo, los criterios de beneficio-costos para comparar el sistema de transporte alternativo consideran sólo los beneficios directos del usuario y los costos de inversión. Es necesario considerar ambos factores, los cuales se podrían considerar como internos al sistema. Pero una vez que se reconoce que las consecuencias primarias de un sistema de transporte son externas y que la función de este sistema es de tipo social, el diseño del sistema óptimo deberá reflejar estas características en una forma más amplia y organizada.

3.4. LOS MODELOS EN LA PLANEACION DE SISTEMAS DE TRANSPORTE.

Como se mencionó en el primer capítulo, la Ingeniería de Sistemas estructura el uso de una serie de técnicas y herramientas diferentes para la resolución de problemas. Además de las técnicas de la Investigación de Operaciones, cada área de aplicación desarrolla sus propios métodos y modelos.

que se adapten mejor a las situaciones en estudio. Si y entid
 - De este modo, en el área de transportes se han elabora-
 do diversos modelos que se aplican a distintos aspectos de
 los sistemas en cuestión.

- De hecho, ya hemos expuesto algunos de ellos en seccio-
 nes anteriores. Y hemos procedido de esa manera con el fin
 de dar claridad y coherencia a los conceptos ahí analizados.

- Aquí, hacemos mención de algunos modelos utilizados en
 la planeación y el diseño de los sistemas de transporte.

3.4.1. Fijación de políticas.

- Para la etapa de planeación correspondiente a la fija-
 ción de políticas, los siguientes métodos son apropiados:

1) Método Delfos: Se basa en la participación de un gru-
 po de expertos en diversos aspectos del sistema con el obje-
 to de conjuntar opiniones, juicios y consideraciones. El mé-
 todo Delfos se aplica de la siguiente manera: a cada uno de
 los participantes se les envía un cuestionario en el que se
 les solicitan sus respuestas a una serie de preguntas rela-
 cionadas con el sistema, que ellos contestan y envían a los
 coordinadores. Estos, una vez que han recibido las respues-
 tas de todos los expertos, analizan las contestaciones tra-
 tando de encontrar aspectos y comentarios comunes, y en fun-
 ción de ellos formular nuevos cuestionarios, repitiéndose a-

si el procedimiento hasta que, al cabo de algunas iteraciones, haya consenso en cuanto al conjunto de objetivos y de criterios de evaluación que predominen y que finalmente sean los que se consideran más idóneos para el sistema en estudio. Hay que proceder con cuidado, tanto en la selección de los expertos como en la formulación de los cuestionarios, ya que de no hacerlo así puede surgir una diversificación de las respuestas que dificulte la obtención del consenso.

ii) Tormenta de Ideas: Se reúne a un grupo de personas con conocimientos sobre el tema y se les pide que den ideas respecto a lo que ellos consideran que deberían ser los objetivos y criterios de evaluación del sistema, sin fijarles ninguna limitación en cuanto al contenido de las proposiciones, procurando incluso estimular las ideas nuevas o revolucionarias. La única restricción existente es la de no evaluar ninguna de las proposiciones durante la sesión, ya que al hacerlo se inhibe el proceso creativo de los participantes. La reunión finaliza cuando se agotan las proposiciones. Posteriormente se analizan los resultados, se evalúan y se escogen los objetivos y los criterios de evaluación que se consideren más apropiados para el sistema.

3.4.2 Estudios y pronósticos.

En la etapa del proceso de planeación del transporte --

donde se realizan estudios y pronósticos, se recopila la información disponible y, mediante el uso de distintos modelos, se hacen pronósticos del estado futuro. Para ello se efectuaron encuestas, estudios de origen y destino, estudios de Ingeniería de Tránsito, estudios socioeconómicos de las poblaciones, inventarios de la red de transporte, etc.

a) Modelos del uso del suelo.

i) Modelo de Lowry: En este modelo se relacionan tres elementos básicos del sistema (población, empleo y medios de comunicación) por medio de los principios de la economía base, de localización de actividades mediante modelos de gravedad y de un mecanismo para entrelazar las dos partes anteriores.

Aplicando los fundamentos de la economía base se supone que todos los empleos de la región en estudio son de dos tipos: básicos o de servicios. En los empleos básicos se producen únicamente bienes que se exportarán de la región, o sea, todos aquellos bienes que intervienen en la actividad productiva de la nación. Los empleos de servicios surgen para satisfacer las necesidades de los empleados básicos, y se producen en actividades locales como comercio y servicios públicos (correo, policía, limpieza, etc.).

Para efectuar un pronóstico de la población y del número de empleos en una región determinada se procede así:

1. Se calculan relaciones entre la población total (P), el -

si el procedimiento hasta que, al cabo de algunas iteraciones, haya consenso en cuanto al conjunto de objetivos y de criterios de evaluación que predominen y que finalmente sean los que se consideran más idóneos para el sistema en estudio. Hay que proceder con cuidado, tanto en la selección de los expertos como en la formulación de los cuestionarios, ya que de no hacerlo así puede surgir una diversificación de las respuestas que dificulte la obtención del consenso.

ii) Tormenta de Ideas: Se reúne a un grupo de personas con conocimientos sobre el tema y se les pide que den ideas respecto a lo que ellos consideran que deberían ser los objetivos y criterios de evaluación del sistema, sin fijarles ninguna limitación en cuanto al contenido de las proposiciones, procurando incluso estimular las ideas nuevas o revolucionarias. La única restricción existente es la de no evaluar ninguna de las proposiciones durante la sesión, ya que al hacerlo se inhibe el proceso creativo de los participantes. La reunión finaliza cuando se agotan las proposiciones. Posteriormente se analizan los resultados, se evalúan y se escogen los objetivos y los criterios de evaluación que se consideren más apropiados para el sistema.

3.4.2 Estudios y pronósticos.

En la etapa del proceso de planeación del transporte --

donde se realizan estudios y pronósticos, se recopila la información disponible y, mediante el uso de distintos modelos, se hacen pronósticos del estado futuro. Para ello se efectúan encuestas, estudios de origen y destino, estudios de Ingeniería de Tránsito, estudios socioeconómicos de las poblaciones, inventarios de la red de transporte, etc.

a) Modelos del uso del suelo.

1) Modelo de Lowry: En este modelo se relacionan tres elementos básicos del sistema (población, empleo y medios de comunicación) por medio de los principios de la economía base, de localización de actividades mediante modelos de gravedad y de un mecanismo para entrelazar las dos partes anteriores.

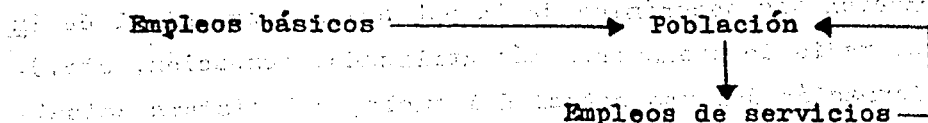
Aplicando los fundamentos de la economía base se supone que todos los empleos de la región en estudio son de dos tipos: básicos o de servicios. En los empleos básicos se producen únicamente bienes que se exportarán de la región, o sea, todos aquellos bienes que intervienen en la actividad productiva de la nación. Los empleos de servicios surgen para satisfacer las necesidades de los empleados básicos, y se producen en actividades locales como comercio y servicios públicos (correo, policía, limpieza, etc.).

Para efectuar un pronóstico de la población y del número de empleos en una región determinada se procede así:

1. Se calculan relaciones entre la población total (P), el -

el número de empleos básicos (B) y el número de empleos de servicios (S) con los datos actuales ($\alpha = P/B+S$; $\beta = S/P$).

2. Dados α , β y un pronóstico del número de empleos básicos para una cierta fecha se calcula la población futura debida a los empleados básicos; esta población genera empleos de servicios, los cuales a su vez generan población que necesita de servicios. Este ciclo se continúa hasta que los incrementos de la población son prácticamente nulos y la situación está en equilibrio. La primera parte del modelo funciona tal como se ilustra a continuación:



3. Para localizar las actividades de la región es necesario dividirla en zonas y calcular la probabilidad de interacción de dos zonas en función de sus potenciales de emisión y de atracción de viajes, y de alguna medida de la distancia entre ambas zonas (tiempo, costo, kilometraje). Para ello se utilizan modelos de gravedad parecidos a los que se emplean en la distribución de viajes, cuya función específica es la de pronosticar los lugares en los que preferirían vivir los habitantes de la población, dada la localización de sus empleos.
4. Sin embargo, es necesario un mecanismo que permita integrar las dos componentes anteriores; tal mecanismo funciona operando el modelo gravitacional sólo para empleados -

básicos, lo que permite determinar el número de empleados básicos y de la población básica que vive en una zona. Conocido este dato, y utilizando el método de la economía base, se puede calcular el número de empleos de servicio y por consiguiente la población total. Este procedimiento se repite para cada una de las zonas y así se obtiene la población futura total y su distribución en cada una de las zonas de la región.

ii) Modelo EMPIRIC: Este modelo se desarrolló en 1966 y ha sido aplicado en Boston, Massachussets, E.U.A. Se basa en información socioeconómica de la población (como nivel de ingresos, medio de transporte más utilizado, ocupación, etc.), en información del uso actual del suelo, del sistema actual de transporte y de los servicios existentes para hacer los pronósticos sobre futuros usos del suelo. Todos esos datos deben recabarse para el año actual y para aquél que sea objeto del pronóstico. Las variables más importantes son: ingresos, empleo, disponibilidad del área urbana, tipo de abastecimiento de agua y drenaje, tiempos de recorrido entre distintas zonas (para transporte público y transporte particular), etc. Dicha información debe referirse a cada una de las zonas en que se divida la región en estudio. Con esos datos, el modelo se encarga de distribuir los valores proyectados de cada variable de uso regional del suelo en todas las zonas y los resultados que proporciona son proyecciones del número de familias de distintos ingresos que habitarán en cada zona y del número de empleados de distintos tipos que tra

bajan en cada zona. Para ello es necesario seguir un proceso bastante oscuro y complicado en el que se usan ecuaciones obtenidas por medio de regresión lineal múltiple. Esas ecuaciones se deben deducir para cada región a la que se aplique el modelo.

iii) Modelo NBER: Este es el modelo más reciente sobre el uso del suelo y fue publicado en 1972 por el National Bureau of Economic Research. El modelo es único ya que se basa en la estructura económica urbana para realizar sus pronósticos. Se trata de un modelo muy complejo que sólo puede ocuparse con la ayuda de computadoras de gran capacidad.

Entre las desventajas de estos modelos cabe considerar que parten de hipótesis muy simplificadas y por lo tanto sus resultados no son muy confiables; además, la mayoría de ellos son confusos y complejos, y sus necesidades de información son impresionantes.

b) Modelos de generación de viajes.

Estos modelos establecen la unión entre los pronósticos del uso del suelo y las demandas de viajes. Su función es pronosticar el número de viajes generados en distintas zonas, en base a características socioeconómicas, y pronosticar el número de viajes atraídos según el uso del suelo en cada una de esas zonas.

i) Análisis de regresión: Esta técnica pretende pronosticar el número futuro de viajes generados, ajustando curvas a datos actuales de viajes interzonales y a datos demográficos. Se supone que los parámetros de las curvas ajustadas permanecen constantes a través del tiempo, y con los pronósticos de las variables independientes calculados en los modelos de uso del suelo se obtienen los valores futuros del número de viajes generados. Algunas de las variables independientes son: densidad del área considerada, número de familias en la región e ingreso familiar. Entre las variables dependientes se cuentan los viajes-persona por familia, viajes escolares por persona, etc.

Para pronosticar el número futuro de viajes atraídos se combina el análisis de regresión con la clasificación en cruz. Para cada zona se calcula el número de viajes realizados por cada uso del suelo distinto; este total se divide entre el área total de la zona destinada a ese uso del suelo y se obtiene una relación que se supone constante. Con el área futura pronosticada para el uso del suelo se puede calcular el número futuro de viajes atraídos. Para medir la confiabilidad del análisis se establecen ecuaciones de regresión de la forma:

$$y_{1j} = b_{1j} x_{11j} + b_{2j} x_{21j} + a_j$$

donde

V_{ij} : número total de viajes diarios por personas al uso del suelo "j" en la zona "i";
 X_{1ij} : área del uso del suelo "j" en la zona "i";
 X_{2ij} : número de empleados asociados al uso del suelo "j" en la zona "i";
 b_{1j}, a_j : coeficientes ajustados.

ii) Clasificación en Cruz: En esta técnica se utiliza el análisis de clasificación en cruz para la generación de los viajes y una clasificación en cruz modificada para calcular el número de viajes atraídos.

El cálculo del número generado de viajes se realiza tomando como base el extremo casa y para ello es necesario contar con información sobre ingreso familiar y propiedad de vehículos. Después, por medio de curvas ingreso-propiedad de vehículos se determina el porcentaje de hogares con 0, 1, 2, 3 y más vehículos. Con este porcentaje y el número de viajes-persona por casa, obtenido de otra curva ingreso-propiedad de vehículos, se calcula el número total de viajes generados, el cual se distribuye dependiendo del porcentaje de viajes según propósito, obtenido a su vez de una curva ingreso-propósito de viaje. Las tres curvas mencionadas se obtienen de estudios de origen y destino o se toman las preparadas para otras poblaciones, cuidando que sus características sean más o menos parecidas a las de la región en estudio.

El número pronosticado de viajes atraídos se obtiene por medio de tasas que se calculan dividiendo el número total de viajes por uso del suelo entre el número total de ac-

tividades de ese uso del suelo. Así, por ejemplo, la relación para viajes casa-trabajo no comercial se calcula dividiendo el número de viajes casa-trabajo no comercial entre el número de empleos no comerciales del área. Estas relaciones se suponen constantes a través del tiempo, de manera que al multiplicarlas por los pronósticos de actividades futuras se obtienen los pronósticos de viajes atraídos por los distintos destinos.

Estos modelos consideran que todos los viajes se generan en casa habitación lo que produce inexactitudes en los pronósticos; además suponen que todos los viajes que se inician dentro de la región terminan dentro de ella, ignorando los viajes en los que eso no sucede y los que sólo atraviesan la región.

c) Modelos de distribución de viajes.

Los modelos de distribución de viajes se usan después de la fase de generación de viajes y su función específica es la de distribuir los viajes generados en cada una de las zonas en todas las demás. En ese proceso influye el tipo y la cantidad de las instalaciones de transporte, los patrones de uso del suelo y las características socioeconómicas de la población de cada región.

Los modelos de distribución de viajes más conocidos son los de gravedad, los de factor de crecimiento, los de oportunidad y los de entropía mínima; existiendo versiones innumerables de ellos. Los más comunes y los que han dado mejores-

resultados son los modelos de gravedad. 11

1) Modelos de Gravedad: Estos modelos surgieron como una analogía con la ley de la Gravitación Universal de Newton, la cual dice que la fuerza de atracción entre dos cuerpos es directamente proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. ---
 Aplicando esta analogía al transporte, se podría expresar de la siguiente manera: el número de viajes entre dos zonas determinadas es directamente proporcional al número total de viajes generados en una y al número total de viajes atraídos por la otra e inversamente proporcional a alguna variable --- que refleje la distancia entre las dos zonas (kilometraje, tiempo, costo, etc.).
 Se han desarrollado versiones del modelo en las que se toman en cuenta la influencia de otras zonas en la distribución de los viajes de la siguiente manera:

$$T_{ij} = P_i \frac{A_j/d_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_j/d_{ij}^b}$$

donde

- T_{ij} : número de viajes producidos en la zona "i" y atraídos por la zona "j".
- P_i : número de viajes producidos por la zona "i".
- A_j : número de viajes atraídos por la zona "j".

d_{ij} : distancia entre las zonas "i" y "j" que en general se expresa como tiempo de viaje.

b : coeficiente determinado empíricamente para tomar en cuenta la lejanía existente entre ambas zonas.

Los valores de P_i y A_j se obtienen de los modelos de generación de viajes.

La naturaleza distinta de los viajes hace conveniente realizar la distribución de acuerdo a cada tipo, ya que el valor del exponente "b" puede cambiar en forma significativa.

En cuanto a la selección de modo de transporte, no se puede hablar de modelos específicos, ya que en general ha prevalecido la tendencia a desarrollar uno para cada estudio en particular. Sin embargo se han buscado alternativas para desarrollar tales modelos de selección de modos; algunas de ellas son:

1. Presentación subjetiva de alternativas y resultados: Se presentan los resultados de varias alternativas de planes de transporte al encargado de tomar las decisiones en forma objetiva e imparcial, para que él escoja la que más convenga según su juicio.
2. Modelos basados en la opinión pública: Se hacen encuestas entre el público para conocer su preferencia y preparar los modelos.
3. Modelos teóricos: Consiste en encontrar un marco teórico válido para el desarrollo de modelos para cualquier re-

liar de algoritmos como el Moore del cual existen varios programas. Pero los resultados de este modelo no siempre son satisfactorios, ya que el usuario del sistema no siempre escoge la ruta más rápida.

Los modelos probabilísticos son los que ofrecen mejores perspectivas para el futuro, ya que permiten tomar en cuenta no sólo la ruta más rápida, sino también otras rutas que pueden resultar atractivas por otras razones, y por lo tanto no asignan todo el volumen de tránsito a una sola ruta, sino que lo reparten mejor.

3.4.3 Estudio de alternativas.

Por otro lado, la etapa de la planeación referente al estudio de alternativas se divide en dos partes: la generación de alternativas y la evaluación de las mismas con la selección de la que sea más conveniente. La generación de alternativas no precisa el uso de modelos formales, ya que el proceso consiste esencialmente en la recopilación y presentación de información; mientras que la evaluación de alternativas sí requiere de tales modelos. Para ser efectivo, el proceso de generación de alternativas conjunta varios elementos: información sobre fases anteriores de la planeación, creatividad e imaginación, y la presentación adecuada de cada alternativa. La evaluación de alternativas se ha realizado tradicionalmente con ayuda del modelo de análisis beneficio-con

gión. Este trabajo tiene los objetivos de cada una de las etapas de un plan de desarrollo en el campo de la asignación de viajes.

d) Modelos de asignación de viajes.

Los modelos de asignación de viajes se utilizan para distribuir los viajes que se generan en una cierta zona en toda la red de transporte y los resultados que proporcionan son los que más influyen en la toma de decisiones. Estos resultados constituyen el producto final de la etapa de la planeación dedicada a estudios y pronósticos.

Existen varios tipos de modelos, pero en todos se requiere representar la estructura de la red, obtener sus parámetros (distancias, tiempos de recorrido, etc.) y determinar qué es lo que se desea distribuir (vehículos, personas, carga u otros). Las aplicaciones más importantes de los modelos de asignación de viajes son:

1. Desarrollo y simulación de sistemas alternativos de transporte.
2. Establecimiento de programas a corto plazo para la construcción de nuevas instalaciones de transporte.
3. Análisis de localización para otro tipo de instalaciones y servicios.
4. Información relevante para otras etapas de la planeación.

Uno de los modelos más usados es el de asignación "todo o nada", donde el volumen total entre dos zonas se asigna a la ruta más rápida. Para conocer esa ruta nos podemos auxi-

to, el cual ya hemos tratado con anterioridad; sin embargo, - las últimas investigaciones proponen el uso de un nuevo modo de evaluación denominado modelo de costo-efectividad, que aun con deficiencias representa un buen avance.

- Modelo costo-efectividad: Inicialmente se aplicó el modelo a proyectos militares, pero se ha encontrado que también es útil para evaluar proyectos de transporte y, en general, para todo tipo de proyecto de objetivos múltiples. Como su nombre lo indica, considera por un lado el aspecto de los costos y por el otro lado el aspecto de la efectividad del proyecto o medida en que se cumplen los objetivos. Dentro de los costos se incluyen todos aquellos que son necesarios para implementar el sistema: diseño, construcción, operación, mantenimiento, etc., y en la efectividad se examina qué tan eficaz es cada proyecto alternativo en la consecución de los objetivos. Para ello, se analizan subjetivamente aspectos importantes difíciles de cuantificar.

La información recopilada sobre costos y efectividad de cada uno de los proyectos alternativos se presentan en gráficas, tablas o esquemas comparativos a las personas encargadas de tomar la decisión final, las cuales deciden en forma subjetiva la alternativa que se ha de implementar.

3.4.4 Ejecución e implementación.

Finalmente, en la implementación del sistema de transporte se deben observar tres aspectos importantes: el financiero, el legal y el técnico.

El primer aspecto requiere de modelos financieros que permitan asignar los recursos monetarios y controlar su uso.

En el segundo aspecto se recurre a reglas y leyes que normen los problemas legales que se presenten.

Y en el tercer aspecto se utilizan modelos icónicos y físicos (planos y maquetas), y modelos matemáticos de optimización y de simulación.

...ob aprimeat ane ab ablocafiga ai ab ancaicrtaali etnemaola
 ai ab notatam col ancaicrtaali que ancaicrtaali ab ancaicrtaali ai
 an caico ancaicrtaali ancaicrtaali ancaicrtaali ab ancaicrtaali
 ancaicrtaali ancaicrtaali ancaicrtaali ancaicrtaali ancaicrtaali ancaicrtaali

casos 4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.

...caico ancaicrtaali ancaicrtaali ancaicrtaali ancaicrtaali ancaicrtaali
 ancaicrtaali ancaicrtaali ancaicrtaali ancaicrtaali ancaicrtaali ancaicrtaali

Recordando la metodología de la Ingeniería de Sistemas, si se desea resolver un problema real de transportes, es requisito indispensable conjuntar un grupo interdisciplinario o equipo de investigadores que proporcione sugerencias que conduzcan a la toma de decisiones apropiadas al respecto. -- Por tal motivo, el intentar dar solución a una situación -- real en esta sección resulta inconveniente.

A cambio presentamos una serie de ejemplos que ilustran el potencial de las herramientas de la Ingeniería de Siste-- mas para atacar problemas complejos, y la aplicación de las técnicas de la Investigación de Operaciones en la búsqueda -- de soluciones adecuadas.

Algunos de estos ejemplos se refieren a situaciones rea-- les que fueron estudiadas por equipos de investigadores que hicieron uso del enfoque de sistemas para afrontarlas y que, por consiguiente, siguieron un procedimiento apropiado para la obtención de una solución. Otros sólo son ejemplos sim-- ples de carácter académico, útiles para enseñar el modo de -- implementar la Ingeniería de Sistemas en los problemas de -- transporte.

Es menester advertir que los siguientes ejemplos son ú--

nicamente ilustraciones de la aplicación de las técnicas de la Ingeniería de Sistemas, específicamente los métodos de la Investigación de Operaciones, y no deben ser tomados como modelos para seguirse en la práctica, pues las situaciones que se describen están quizás simplificadas en exceso.

Por otra parte, las condiciones para que exista el más simple de los problemas, según Ackoff y Sasieni (referencia 1), son:

- a) Debe existir por lo menos un individuo que se encuentra dentro de un marco de referencia, al cual se le puede atribuir el problema del sistema.
- b) El individuo debe tener, por lo menos, un par de alternativas para resolver su problema. En caso contrario no existe el problema.
- c) Deben existir, por lo menos, un par de soluciones, una de las cuales debe tener mayor aceptación que la otra en el individuo. En caso contrario, no existe el problema. Esta preferencia está asociada a un cierto objetivo dentro del marco de referencia en donde se encuentra el individuo del sistema.
- d) La selección de cualquiera de las soluciones debe repercutir de manera diferente en los objetivos del sistema, es decir, existe una eficiencia y/o efectividad asociada con cada solución. Estas eficiencias y/o efectividades deben ser diferentes, puesto que de lo contrario no existe un problema.
- e) Por último, el individuo que toma las decisiones ignora -

-- las soluciones y/o eficiencias y/o efectividades asociadas con las soluciones del problema.

Si estas cinco situaciones existen, entonces se tiene un problema. Esta situación puede complicarse en los siguientes casos:

- a) El problema recae en un grupo, no en un individuo.
- b) El marco de referencia donde se encuentra el grupo, cambia en forma dinámica.
- c) El número de alternativas que el grupo puede escoger es bastante grande, pero finito.
- d) El grupo dentro del sistema puede tener objetivos múltiples. Peor aún, no necesariamente estos objetivos son consistentes entre sí.
- e) Las alternativas que selecciona el grupo son ejecutadas por otro grupo ajeno, al cual no se le puede considerar como elemento independiente del problema.
- f) Los efectos de la decisión del grupo pueden sentirse por elementos que aun siendo ajenos al sistema considerado, influyen directa o indirectamente, favorable o desfavorablemente hacia él (políticos, usuarios, etcétera).

Para formular un problema se necesita la siguiente información:

- a) ¿Existe un problema?
- b) ¿De quién es el problema?

- c) **¿Cuál es el marco de referencia del sistema donde se encuentra el problema?**
- d) **¿Quién o quiénes toman las decisiones?**
- e) **¿Cuáles son sus objetivos?**
- f) **¿Cuáles son las componentes controlables del sistema y cuáles no lo son?**
- g) **¿Cuáles son las interrelaciones más importantes del sistema?**
- h) **¿Cómo se emplearán los resultados del proyecto de Investigación de Operaciones? ¿Por quién? ¿Qué efectos tendrá?**
- i) **¿Las soluciones tendrán efecto a corto o largo plazo?**
- j) **¿Podrán los efectos de las soluciones modificarse o cambiarse fácilmente?**
- k) **¿Cuántos elementos del sistema se afectarán por las soluciones del proyecto? ¿En qué grado?**

Formular un problema requiere:

- a) **Identificar las componentes controlables y no controlables de un sistema.**
- b) **Identificar posibles rutas de acción, dadas por las componentes controlables.**
- c) **Definir el marco de referencia, dado por las componentes no controlables.**
- d) **Definir los objetivos que se persiguen y clasificarlos -- por su orden de importancia.**
- e) **Identificar las interrelaciones importantes entre las diferentes componentes del sistema. Este paso equivale a en**

contrar las restricciones que existen, a la vez que permite más adelante representar estas interrelaciones en forma matemática.

EJEMPLO No. 1: EL ENFOQUE DE EFICIENCIA VS. EL ENFOQUE DE SISTEMAS.

Un objetivo general de todos los administradores de sistemas ha sido siempre lograr la eficiencia de operaciones o, dicho en otras palabras, el objetivo de reducir los costos.

La filosofía del enfoque de eficiencia respecto a sistemas, se basa en la idea de la "única mejor manera", o sea, la forma correcta de realizar una tarea. Este tipo de enfoque puede consistir en calcular cada movimiento y planear los pasos de la tarea para minimizar tiempo, por ejemplo.

Por su parte, el enfoque de sistemas argumenta que concentrarse en la eficiencia en sí misma puede ser una manera ineficiente de administrar un sistema, desde un punto de vista general. Dicho en otra forma, la "única mejor manera" puede no ser la manera óptima para el sistema completo.

El argumento del enfoque de sistemas en contra de la "eficiencia" es que siempre se le concibe en relación con un pequeño segmento del sistema total. La mera atención a la reducción de costos, por sí sola, podrá hacer exactamente lo contrario a lo deseado. En realidad, la reducción de costos en muchos casos puede aumentar el costo total del sistema. Tales circunstancias muestran cómo las consideraciones de eficiencia por sí solas impiden pensar acerca de la situación

total del sistema.

Para comprender lo anterior consideremos un aeropuerto en donde los aviones aterrizan y despegan en una sola pista durante el día. Para simplificar el ejemplo en su principio, supongamos que los aviones aterrizan y despegan exactamente con un minuto de diferencia y también que se requiere exactamente un minuto para que el avión despegue de la pista. El partidario de la eficiencia puede estar muy contento en la operación del aeropuerto; podrá ver que la pista está en continuo uso y que no existen condiciones conflictivas resultantes del amontonamiento de aviones. A medida que cada avión aterriza o despegue, ocupa la pista por cierto tiempo fijo y se aleja de ella en el tiempo suficiente para que aterrice o despegue otro avión.

Pero ahora pensemos que la situación cambia un poco. Supongamos que en nuestro ejemplo los aviones aterrizan o despegan "en promedio" una vez cada minuto y "en promedio" se requiere un minuto para despejar la pista. La frase "en promedio" significa que en ocasiones dos o más aviones llegarán o partirán muy cerca el uno del otro, y esto se emparejará en ocasiones en que la llegada y el despegue ocurra en un mayor intervalo. Si cronometraran los aterrizajes y los despegues, uno encontraría que el promedio es aún de un minuto -- por cada uno, pero que en ciertos casos habrá varios aviones que requerirán servicio al mismo tiempo, en tanto que en otros ningún aterrizaje o despegue ocurrirá en un lapso de, digamos, dos o tres minutos. La misma situación se aplica en el uso de la pista. En algunos casos los aviones son lentos-

y ocupan la pista por un periodo superior a un minuto, en -- tanto que en otros, el piloto y las condiciones del viento -- permiten que el avión despegue en menos del tiempo promedio.

¿Qué ocurriría en este caso? Los resultados son bastante alarmantes y pueden ser resueltos mediante un "modelo probabilístico". El modelo probabilístico opera en gran parte -- con el mismo principio que una máquina tragamonedas para juegos de azar; nos dice la probabilidad de que ciertos eventos ocurran. Lo que nos interesa en nuestro ejemplo, son los dos tipos específicos de eventos: la pista desocupada y el avión en espera. Si la pista está desocupada por demasiado tiempo, es "ineficiente"; así como si los aviones tienen que esperar demasiado tiempo, su actuación también será ineficiente. Una ineficiencia tiende a equilibrarse con la otra y este es el punto en que el analista de sistemas (que hace uso del enfoque de sistemas) piensa que el experto en eficiencia falla. -- En el caso de un aeropuerto se podrá mostrar que si la varia ción en los requerimientos de servicios y ocupación de la -- pista siguiera el patrón acostumbrado, la línea de espera de los aviones eventualmente aumentaría sin límite alguno. En o tras palabras, el sistema se hace cada vez más ineficiente -- en términos de la línea de espera, aun cuando la pista se u- tilice "eficientemente". Uno no podría predecir este resulta do sin el uso de la teoría de la probabilidad, pero el resul tado es verdadero de todos modos.

Por lo tanto, si el analista del sistema sugiere al ad ministrador eficiente de este aeropuerto que él instale una pista adicional para resolver el problema de los aviones en-

espera, el administrador que está preocupado excesivamente -- en la reducción de costos se resistirá a la sugerencia. El -- señalará que en ciertos momentos del día la pista ni siquiera se utiliza; en otras palabras, aquí se tiene una unidad de equipo que permanece ocioso por cierto periodo y, sin embargo, alguien tiene la idea de sugerir equipo adicional. Pero el administrador está concentrándose tan sólo en un aspecto del sistema total. Si empieza a pensar acerca del sistema total, él habrá de ver que las incertidumbres relacionadas con los aterrizajes y dar servicio, hacen absolutamente esencial que en cierto momento del día la pista quede sin utilizarse. Esta ociosidad "ineficiente" es absolutamente necesaria mientras tanto no se puedan controlar exactamente los arribos y el tiempo de servicio a los aviones. Ahora puede ser posible, por supuesto, hacer más eficiente el sistema de tal manera que los aviones se programen para que aterricen y salgan exactamente con un minuto de diferencia, pero los costos para lograr esto pueden ser muy superiores a la simple decisión de añadir una unidad adicional de servicio.

El analista del sistema puede construir una tabla muy sencilla, pero bastante clara, que ilustre la situación para el gerente del aeropuerto. Esta tabla mostrará la cantidad promedio de tiempo que los aviones tendrían que esperar, considerando que hubiere una, dos o tres pistas disponibles, bajo la condición que el promedio de tiempo para demandar servicio es de un minuto, y el tiempo promedio para desalojar la pista sea de un minuto. Al desarrollar estas estadísticas, el analista de sistemas está pensando que los aviones en es-

para son un costo. Si el administrador amplía su perspectiva para que incluya el costo de espera, así como el costo de las unidades ociosas de servicio, entonces podrá sentirse completamente justificado en pedir que se instalen pistas adicionales, decisión tomada sobre una base de "eficiencia".

Por otra parte, hay que ver qué nivel de servicio se desea. Obviamente, algunos aviones tendrán que esperar, o bien algunas pistas de aterrizaje estarán ociosas o ambos casos. ¿Qué combinación de espera y ociosidad es óptima para todo el sistema? Señalar, bien sea la ociosidad o la espera como "ineficiente" por sí sola es pasar por alto la idea central de la planeación del sistema del analista. El costo total de la operación del aeropuerto tiene que calcularse para cada política. Y esto tan sólo podrá hacerse mediante un modelo de sistemas.

El problema consiste en "optimizar" la efectividad total del sistema, o sea, minimizar el costo de espera más el costo de tiempo ocioso. Esto se puede lograr por medio de un modelo de líneas de espera del tipo de los que se describieron en el primer capítulo.

EJEMPLO No. 2: APLICACION DEL ENFOQUE DE SISTEMAS.

El ejemplo que presentamos aquí se refiere a la industria marítima, que transporta carga por mar y ríon. Lo hemos seleccionado porque representa un problema real que fue tratado por un equipo de investigadores; y aun cuando carece de detalles técnicos, ilustra bastante bien la aplicación del -

enfoque de sistemas a un problema de sistemas de transporte.

El estudio que a continuación exponemos se informa en:
 -- "San Francisco Port Study", Vol. II, parte V, National Academy of Sciences - National Research Council.

A pesar que la industria marítima es en algún sentido una de las más viejas industrias del transporte, su avance tecnológico ha sido muy lento. La manera de cargar y descargar mercancía, que se usa en la actualidad, es realmente la misma técnica que era utilizada en los tiempos de los griegos, o de los indios de América. Esencialmente, la carga se coloca en la embarcación de tal manera que la nave no se hunda, luego se transporta y por último se descarga en tierra.

La industria marítima en los Estados Unidos ha tenido muchos problemas recientemente. Como consecuencia de esta situación, el gobierno, por conducto del Consejo Nacional de Investigación y la Academia Nacional de Ciencias, seleccionó un grupo de equipos de investigación para que estudiaran la industria marítima. Una parte del problema de esta industria es que los Estados Unidos están en una mala situación competitiva respecto a la de otros países a causa de su nivel de salarios más elevado. Consecuentemente, la pregunta específica que surgió desde el inicio del proyecto era si había o no algún medio tecnológico para mejorar la actuación de la industria que pudiera contrarrestar los costos más elevados de la mano de obra.

La experiencia muestra que los principales costos del manejo total de la carga en la industria marítima, ocurren -

en los muelles, en la operación de carga y descarga y no en el transporte entre puertos. Un equipo de ingenieros industriales, por lo tanto, empezó a trabajar para determinar si había algunas ideas innovadoras que pudiesen ser utilizadas en el muelle en el manejo de la carga. Si el equipo de investigadores hubiera procedido dentro del marco de eficiencia pura, entonces su objetivo hubiera sido tratar de incluir en la operación de carga y descarga avances tecnológicos que hubieren hecho la operación más eficiente, o sea, menos costosa por unidad de material manejado.

Sin embargo, el equipo de investigadores pronto comprendió que la operación de cargar y descargar embarcaciones está incluida dentro de un sistema más grande y que éste se compone de: 1) las compañías propietarias de los barcos, 2) los sindicatos, 3) los llamados trabajadores eventuales (no son miembros del sindicato, pero que se les llama siempre -- que el volumen de trabajo aumenta), 4) el público en general. Si se pudiera ser "eficiente" en el manejo de la carga, entonces estas eficiencias probablemente darían como resultado una disminución en la demanda para mano de obra y un aumento de utilidades para las compañías. En los grandes sistemas, -- por lo tanto, uno esperaría que las llamadas eficiencias que los ingenieros pudiesen descubrir, ocasionarían, si se llevaran a cabo, serios problemas en la administración no sólo de los trabajadores y compañías, sino también del público. Consecuentemente se pensó que era deseable estudiar el puerto -- como un sistema, más que concentrarse en mejorar la eficiencia en cuanto al manejo de carga para cada barco.

Al principio, el analista se enfrenta a uno de los problemas más complicados de todo el estudio, y se plantea así: ¿Quién es el que toma decisiones? Para que un analista describa un sistema, resulta esencial que el tomador de decisiones sea identificado; de lo contrario, no existe una forma clara para determinar cuáles son los objetivos y los recursos del medio ambiente. Bueno, entonces ¿quién toma las decisiones respecto a las operaciones de un puerto? Hasta cierto grado, las compañías lo hacen, ya que son ellas quienes diseñan la programación de los buques y determinan en parte qué se va a cargar y descargar. También los sindicatos, obviamente, tienen algo que decir respecto a cómo se debe operar un puerto, pues los estibadores trabajarán en ciertos días y en otros no. El público decide algunas cosas, por medio de sus representantes legislativos; cada puerto tiene una autoridad que establece las condiciones bajo las cuales la carga y descarga de buques se llevará a cabo.

Sin embargo, desde el punto de vista de este estudio, ninguno de éstos es quien verdaderamente toma las decisiones. El estudio se está llevando a cabo por el gobierno federal y específicamente por dos de sus agencias. El propósito del estudio es establecer algunas estrategias que estas agencias puedan sugerir en términos de sus recomendaciones, bien sea bajo la forma de legislación o como consejo para otras dependencias gubernamentales. Consecuentemente, el tomador de decisiones se considera que son las dos agencias para las cuales se hizo el estudio.

El candidato del analista para tomador de decisiones --

tiene alguna característica poco común. Por ejemplo, el tomador de decisiones no tiene control directo sobre ninguna de las operaciones del puerto; al contrario, únicamente controla las clases de recomendaciones que pueden hacerse. Sin embargo, el objetivo del tomador de decisiones puede hacerse lo suficientemente claro. Desea presentar una recomendación que tenga bastantes probabilidades de ser aceptada, pero que al mismo tiempo sea "justa" para las compañías, para los sindicatos o para el interés del público. Puesto que él está -- "fuera" del sistema, podríamos decirlo así, su concepto meramente racional de la "justicia" puede no coincidir con el -- concepto de "justicia" de aquellos que son los que realmente controlan las operaciones del puerto. Consecuentemente tendrá que conciliar sus nociones de justicia con aquellas que piensan que son aceptadas por las demás partes.

El equipo de investigación visualizó el panorama como -- sigue: si los ingenieros industriales tuvieran éxito para diseñar tecnologías que condujeran a algún ahorro en costos al cargar y descargar buques, entonces estos ahorros en costos deberían derramarse entre las compañías y los sindicatos de tal modo que el interés del público se mantuviera al nivel -- actual. Consecuentemente, el problema se concreta a determinar alguna fórmula que dé ventaja a las compañías y sindicatos. El problema, sin embargo, no podía definirse mejor hasta en tanto el equipo de investigadores hubiera triunfado en describir el puerto como un sistema.

Desde el punto de vista del candidato del analista para tomador de decisiones, gran parte de la situación que ocurre

en el puerto deberá considerarse como del "medio ambiente" del sistema. Antes que nada, existe la política del embarcador. Esta política genera los itinerarios mediante los cuales los barcos arriban y salen del puerto. El tomador de decisiones no tiene control sobre esta política y, en consecuencia, debe tomarse como una constante. Obsérvese la importancia de la decisión del medio ambiente del sistema; si los itinerarios se pudieran cambiar, entonces se podría llegar a una operación más fluida del puerto. Sin embargo, el equipo de estudio tiene que aceptar los itinerarios que fueron diseñados por las compañías. Un comentario más generalizado puede ser que el método para transportar bienes puede ser erróneo; por ejemplo, posiblemente camiones y aviones deberían hacer obsoletas a las embarcaciones. Una vez que los equipos de estudio deciden tomar los itinerarios de llegadas y salidas de barcos como constantes, entonces también suponen que el método existente de transporte por mar es un sistema suficientemente grande para ser examinado.

Dado que los itinerarios existentes son las bases apropiadas para estimar la demanda sobre las instalaciones del puerto, el problema será determinar cuál es realmente la demanda. Una manera para resolver este problema, sería examinar el itinerario de cada embarcador y tratar de determinar exactamente cuándo los barcos llegan y salen del puerto y qué se estará cargando y descargando. Esta solución, sin embargo, sería muy costosa y llena de inexactitudes debido principalmente a que los itinerarios de embarque de ninguna manera son seguidos con toda rigidez.

parece preferible, por lo tanto, revisar la política del embarcador, al programar las entradas y salidas del puerto, examinando un puerto verdadero y determinando la frecuencia de las llegadas y salidas. El puerto de San Francisco fue seleccionado para este estudio porque es de tamaño medio y virtualmente no existe variación estacional. La idea del analista era que el estudio simple de este puerto podría servir como prototipo para otros estudios de puertos.

Los investigadores examinaron registros históricos de llegadas de buques al puerto de San Francisco y determinaron, por ejemplo, que el número de buques que llegaron durante un día, cualquiera de la semana, era de ocho, y que el número más o menos alrededor de este promedio estaba distribuido de acuerdo a una distribución de Poisson. Este hecho inmediatamente sugirió a la mente del investigador que al puerto podría considerársele en términos de un modelo de línea de espera. El arribo de clientes para recibir servicio no sigue un programa determinado, sino una programación probabilística que frecuentemente es tipo Poisson. En la distribución de Poisson, la mayoría de las llegadas coinciden o están cercanas al promedio, pero habrá días en que ocurran menos del promedio y días en que haya más del promedio.

Una vez que uno empieza a ver el sistema como de línea de espera, la duda natural es preguntar cómo se presta el servicio. Ahora el servicio de buques en un puerto consiste de una cuadrilla de hombres que trabajan en la bodega, ya sea cargando o descargando el buque por medio de una caja de lastre que es tirada a un lado del buque usando una grúa. Ca

da cuadrilla se compone de catorce hombres. La unidad de trabajo, por lo tanto, es una cuadrilla que trabaja por un turno. Para describir el servicio a los barcos, uno determina qué tantos turnos de cuadrillas son utilizados para dar servicio a un buque durante su estancia en el puerto. Algunos buques sólo requieren de uno o dos turnos de cuadrillas, en tanto que otros requieren hasta de 120. Obviamente, los buques que requieren grandes números son más importantes en términos de la descripción de cómo opera el puerto, pero las demandas más pequeñas deberán tomarse en consideración también en términos de la asignación de la fuerza de trabajo.

Adicionalmente, los dueños de buques no cargan ni descargan a una velocidad constante. Por diversas razones, en un turno podrán contratar seis o siete cuadrillas, en tanto que en otro turno, por ejemplo el vespertino, contratarán tres o cuatro, o a ninguna. Consecuentemente, uno tiene que determinar las estadísticas de la carga y descarga de buques para tener alguna noción de cuánto tiempo estará el barco en el puerto y qué tipo de demandas se requerirán sobre la oferta de mano de obra.

En este ejemplo el equipo de investigadores confió grandemente en experiencias del pasado como la base para determinar cómo funciona el sistema. Esta táctica de su parte deber ser utilizada sólo cuando el equipo de investigadores haya concluido que la política anterior en efecto es parte del medio ambiente del sistema, o sea, parte del sistema que no es controlado por el tomador de decisiones. En este caso, la demanda no está controlada por el tomador de decisiones y, por

lo tanto, el uso de información estadística del pasado se --
justifica.

Los investigadores habían llegado a la siguiente descripción del puerto: podían pronosticar en términos probabilísticos la llegada de buques entre semana, en los domingos y días festivos, etcétera, y podían, sobre una base probabilística, pronosticar cuántas cuadrillas requeriría un barco determinado en cada turno. Consecuentemente, podían pronosticar para cualquier día determinado el número de cuadrillas que se requerirían en un turno dado.

Un último aspecto debe ser incluido: la disponibilidad de la mano de obra, un factor que cambia de un turno a otro debido a enfermedad, vacaciones o simplemente a razones personales de los trabajadores. De nuevo, las estadísticas del pasado podrían utilizarse para pronosticar la distribución probabilística de las cuadrillas disponibles para turnos típicos (días entre semana, A.M., P.M., domingos, días festivos, etc.).

Para poder hacer que todos estos pronósticos encajasen, se desarrolló una simulación con computadora. En la simulación, se escoge un número al azar, el cual determina cuántos barcos llegarán, digamos, en un lunes por la mañana. Para cada barco que llega se determina sobre una base probabilística el número de cuadrillas que requerirá el barco y las formas en que estos requerimientos se habrán de derramar sobre los días que el barco permanezca en el puerto. Otras complejidades, como es que el barco vaya a un muelle seco, también pueden ser insertadas en la simulación.

La simulación también elige un número al azar que señala la cuántos trabajadores se presentarán listos para trabajar, y, por lo tanto, qué tantos turnos se tienen disponibles. En algunos días simulados no existen suficientes cuadrillas para dar servicio a los buques y algunos tienen que permanecer ociosos hasta el turno siguiente o subsecuente. En otros días, no existe suficiente trabajo a desarrollar, estando ociosos los trabajadores. Por lo tanto, la simulación pronostica los costos probables de la falta de trabajadores (barcos ociosos) y la falta de trabajo (hombres ociosos). En efecto, la computadora "simula" cómo se comporta el puerto. La gran ventaja de simulación, por supuesto, es que ahora se puede empezar a hacer cambios en la simulación sin que se afecte para nada el sistema real, y así determinar cómo un cambio en política, por ejemplo, un aumento en eficiencia, técnica de carga y descarga, puede afectar al puerto.

El siguiente paso es ver si la simulación fue o no realista. Esto puede hacerse sobre una base rudimentaria determinando si lo que el simulador hace es similar a lo que el sistema real hace en términos de demandas de fuerza de trabajo, llegada y salida de los barcos, etcótera. Este método rudimentario con frecuencia es bastante esencial; a veces, los investigadores, sin razón alguna, incluyen dentro de la simulación diferentes condiciones que hacen que "estalle" el simulador. En este caso, el estallido puede significar que en la simulación había un número creciente de barcos esperando recibir servicio, sin que hubiesen cuadrillas disponibles para darles servicio; la situación simulada se haría cada vez

peor; en tanto, en realidad nada de esto ocurre en el puerto de San Francisco, salvo que haya una huelga. Afortunadamente, la simulación se asemejó bastante a la realidad.

Luego ocurrió un evento que ayudó considerablemente al equipo de investigadores a aumentar su confianza respecto al simulador. Poco después de que el estudio se había iniciado, hubo una recesión económica que dio como resultado una disminución en la cantidad de carga manejada por la industria marítima en un diez a un quince por ciento. Desafortunada como pudo haber sido la recesión desde el punto de vista del dueño de barcos, fue bastante afortunada desde el punto de vista del investigador. La disminución en el manejo de carga podía haberse considerado exactamente como si hubiera ocurrido una mejora tecnológica de un diez a un quince por ciento. O sea, que si los ingenieros industriales hubieran tenido éxito en aumentar la eficiencia del manejo de la carga, entonces esto podría haber significado, digamos, que un diez a un quince por ciento menos de fuerza de trabajo hubiera sido requerido para manejar la carga. Desde el punto de vista del modelo, la recesión económica y, por lo tanto, el mejoramiento tecnológico, podrían considerarse exactamente como el mismo tipo de fenómeno. Ahora el equipo de investigadores podría pronosticar por medio de un simulador, aun sin observar los efectos de la recesión económica, cómo podría operar el puerto si la demanda para el manejo de carga disminuyese en un diez a un quince por ciento. Esto podría hacerse simplemente cambiándose algunas de las condiciones de la simulación, por ejemplo, disminuyendo el número promedio de cuadri

llas requeridas por los barcos cuando éstos estuviesen en el puerto. De nuevo en estos casos, la simulación logró igualar las realidades de la recesión económica con bastante precisión.

Por supuesto, si la carga de trabajo disminuyese en un diez por ciento y todo el trabajo se realizase, el efecto sobre la fuerza de trabajo es obvio: tendrá un diez por ciento de trabajo menos que hacer y ningún simulador complicado es requerido para saberlo. Pero era interesante determinar el comportamiento de los tiempos ociosos y los tiempos de espera; además, si el sindicato disminuyese su personal, ¿cuál sería el tiempo de espera promedio? Finalmente, si uno lleva el control de la efectividad del sistema, ¿cómo podrá determinarse el sistema óptimo? Estas son preguntas cuyas respuestas requieren las sutilezas de la simulación en una computadora.

Además del esfuerzo de simulación, el equipo de investigadores pensó que era aconsejable ver si era posible o no desarrollar un modelo matemático de la operación del puerto, utilizando algunas suposiciones simplificadoras. Esta siempre es una buena idea cuando se utiliza simulación porque 1) las simulaciones son costosas, y 2) es a veces difícil interpretar todos los resultados que son impresos por la computadora. Siempre que sea posible, será aconsejable un modelo matemático simplificado para apoyar a la simulación.

La lógica del modelo matemático es fácil de captar e ilustrar. Empecemos pensando en todos los barcos que están en el puerto al iniciarse un turno. Cada barco tendrá cierta —

cantidad de trabajo pendiente antes de irse, bien sea de carga o descarga. El trabajo a realizar se mide en términos de turnos de cuadrillas. Llámese W al total de trabajo que se haya de realizar. En San Francisco, en un día normal W puede ser cerca de 350 turnos de cuadrillas. Por supuesto que sólo una parte de W será realizada en uno de los turnos.

Antes del inicio del turno, algunos barcos habrán llegado ya, cada uno esperando que le hagan su trabajo total. Estas llegadas añaden una cierta cantidad a W , llámese A , de tal manera que el trabajo total a realizar ahora es de $W + A$. Pero A no es una constante, pues en diferentes días la cantidad de trabajo a desarrollar en las llegadas variará de acuerdo con una distribución probabilística. Por lo tanto $W + A$ representa tal distribución y podrá ser determinada con experiencia pasada, gracias al análisis estadístico.

Ahora el turno empieza y la fuerza de trabajo inicia su actividad. La pregunta es: ¿cuánto del trabajo $W + A$ harán? La respuesta en parte depende de cómo los dueños del barco programen el trabajo y en parte conforme a los trabajadores se presenten a laborar. Supongamos ahora que entre mayor sea $W + A$, más trabajo se desarrollará en el turno siguiente. Este supuesto sugiere al estadista que utilice registros históricos para estimar el trabajo que se hace en un turno, llámese S , como una función del trabajo total a desarrollar, $W + A$. Al final del turno, la cantidad total de trabajo que aún queda pendiente por realizar será $W + A - S$; ésta también es una distribución probabilística puesto que tanto A como S cambian de día a día.

Ahora supongamos que principiamos de nuevo en el siguiente turno. Existe un trabajo $W + A$ que se desarrolla y un nuevo arribo de trabajo y un último intento de reducir el total. Rectificando los cálculos, podemos eliminar cualquier error en la W original y convertir en un modelo uniforme la distribución interminable de trabajos que debe realizarse. La descripción del modelo uniforme nos permitirá predecir la probabilidad de barcos en espera y fuerza de trabajo ociosa. Además, cambios en el sistema del tipo descrito con anterioridad pueden ser calculados para ver sus efectos sobre el tiempo de espera y la fuerza de trabajo ociosa. Obsérvese que en el modelo matemático, los detalles de todo el trabajo de asignación a cada turno han sido eliminados mediante promedio estadístico; esto significa que el modelo es más sencillo y por lo tanto tiene menos posibilidades de hacer precisiones con exactitud. Pero la simulación y el modelo, conjuntamente, aumentan la confianza del analista en su método, con tal que estén de conformidad, tal como ocurrió en este ejemplo.

El equipo de investigadores supuso que los componentes del sistema eran las compañías, los miembros pertenecientes al sindicato, los eventuales y el público. La simulación determina lo que significa un cambio tecnológico para cada uno de estos componentes, prediciendo cómo el mismo afecta sus objetivos.

Debido a que las compañías y los sindicatos son unidades organizadas, en tanto los eventuales no lo son, el equipo de investigadores decidió que su mayor esfuerzo sería es-

tudiar cómo un mejoramiento tecnológico debe ser dividido entre las compañías y la mano de obra organizada. Si se han de establecer políticas para dividir los beneficios del mejoramiento tecnológico entre las unidades organizadas del sistema, entonces obviamente las políticas más amplias de otros puertos y aun de la industria que no sea del transporte, serán evidenciadas. ¿Es ésta una manera equitativa de derramar los beneficios del avance tecnológico? Debe observarse que el estudio del mejoramiento tecnológico fue patrocinado por el gobierno de los Estados Unidos, lo cual significa que fue patrocinado por el público. Por lo tanto, existe la pregunta razonable de si las ventajas derivadas de la investigación tecnológica patrocinada por el gobierno, no deben derramarse más ampliamente entre el público y no sólo entre las compañías y el sindicato. También existe la duda de si los eventuales, quienes son personas que se benefician de las operaciones llevadas a cabo en el puerto, pero que no son miembros del sindicato, deben tener también sus intereses representados en el mejoramiento tecnológico.

Por último, resulta interesante ver cuál fue el resultado inmediato. En el proceso del estudio, las compañías y el sindicato llegaron a un acuerdo respecto a la manera en que los avances tecnológicos debían dividirse. Una de las compañías por sí misma había estado introduciendo una nueva técnica para el manejo de la carga y esto por sí solo trajo una base para un convenio con el sindicato. La base del convenio no difirió drásticamente de la recomendada por el equipo de investigadores, pero evidentemente adolecía de todas las di-

ficultades de justificación que se acaban de mencionar.

En este ejemplo se encuentra que es mejor hacer uso de un enfoque de sistemas considerando el puerto íntegro y no sólo el mejoramiento de eficiencia en el manejo de la carga.

El estudio mostró que un subsistema del sistema de transporte nacional (concretamente, la carga y descarga de barcos) es un área práctica de estudio por medio del enfoque científico de sistemas, en tanto no sea uno tan minucioso respecto a la medida de actuación del sistema. Por supuesto que éste y estudios similares se han convertido en prototipos para descripciones de terminales en otras áreas de transporte: aeropuertos, ferrocarriles y terminales camióneras, etc.

Este estudio también muestra cómo los modelos y la simulación desarrollan su función en el razonamiento científico.

EJEMPLO No. 3: INGENIERIA DE SISTEMAS APLICADA AL CONTROL

DEL TRANSITO.

El crecimiento rápidamente acelerado del número de vehículos en la Ciudad de México y el deseo de entregar al usuario de la red urbana una operación más eficiente y adecuada del tránsito motivó en las autoridades de la ciudad la introducción de un sistema piloto para el control del tránsito por computadora. Este sistema se denomina "COAUTRAN" (Control Automático del Tránsito) y ya se encuentra en operación.

Aunque se trata de un problema de Ingeniería de Tránsito, la cual se define como la parte de la Ingeniería Civil -

que trata de la planificación, diseño geométrico y operación del tránsito en las calles y carreteras, de sus terminales, de las áreas colindantes, de la red vial y las relaciones con otros medios de transporte, para lograr un movimiento de personas y mercancías en forma segura, económica y cómoda; - lo hemos incluido aquí porque representa un sistema de control como los vistos en el capítulo anterior y porque constituye un subsistema del sistema de transporte urbano. Además, se trata de un ejemplo real de aplicación de la Ingeniería de Sistemas a un problema relacionado con los transportes en el cual puede apreciarse el enfoque dado al mismo, así como la utilización de técnicas de optimización y de simulación en algunas de sus etapas.

Debido a que una presentación exhaustiva y minuciosa del sistema tratado y de cada una de sus partes requeriría un trabajo de varios volúmenes, nos limitaremos a mencionar las etapas que lo constituyen y a enumerar los componentes de cada una de ellas sin entrar en detalle. Un panorama más amplio y preciso del sistema puede consultarse en la referencia 3.

El diseño del sistema se llevó a cabo siguiendo un método simplificado sugerido por un autor de nombre Machol, el cual subdivide el problema en los siguientes términos:

- a) Fases cronológicas en que se divide el diseño del sistema.
- b) Secuencia lógica de pasos que forman el diseño del sistema.

c) Herramientas matemáticas y científicas para el diseño y construcción del sistema.

d) Subsistemas en que puede dividirse el sistema.

e) Partes funcionales que integran el sistema.

De este modo, considerando que el objetivo es diseñar un sistema para el control del tránsito (Sistema COAUTRAN), tenemos:

a) Fases:

1. Recolección de información relativa.

2. Organización del proyecto.

3. Definición de los objetivos del proyecto.

4. Configuración de un proyecto piloto.

5. Diseño final y experimentación.

6. Diseño del proyecto definitivo.

7. Capacitación del personal.

8. Implementación del sistema (posiblemente por etapas).

b) Secuencia lógica:

1. Definición del proyecto piloto y selección del proveedor.

2. Iniciación de la obra civil para la instalación del cableado.

3. Capacitación del personal para la operación y mantenimiento del sistema.

4. Desarrollo del Sistema de Programación para el desarrollo del sistema piloto, utilizando la computadora.
5. Estudios de Ingeniería de Tránsito para operar temporalmente, sobre la base de selección de programas de tiempo fijo.
6. Instalación del equipo en las calles y pruebas de su funcionamiento en la computadora.
7. Prueba del sistema de programación, introduciendo -- los resultados al campo y estando en operación los -- dispositivos de la calle.
8. Análisis de sensibilidad del óptimo, seleccionado -- por el computador, a los cambios en los programas de -- operación.
9. Correspondencia del óptimo. Óptimo seleccionado por -- el computador, comparado con el óptimo subjetivo de -- seable, a partir de los estándares de apreciación -- del tránsito en la calle, según los valores acepta-- dos por la Ingeniería de Tránsito.
10. Desarrollo de nuevos algoritmos para el control del -- tránsito y experimentación.
11. Estudios de "antes y después" de acuerdo con los cri -- terios de la Ingeniería de Tránsito.
12. Análisis de confiabilidad del sistema.
13. Medición estimada de las reacciones del usuario.

c) Herramientas:

1. De Programación:

- El diseño de sistemas en línea.

- Diseño de sistemas en tiempo real.

- Programación estructurada.

- Lenguajes de programación.

2. De Optimización:

- Tratamiento óptimo de líneas de espera.

- Programación matemática (dinámica).

- Optimización iterativo-empírica EVOP (EVOP = Evolutionary Operation Program. Es una técnica utilizada en la optimización de procesos dinámicos cuando no se conoce analíticamente la expresión de la función objetivo y/o de las restricciones).

- Flujo óptimo de redes.

3. De Simulación:

- Simulación del flujo en la red.

- Simulación de intersecciones.

- Estimación de la eficiencia de nuevos algoritmos — vía simulación.

- Simulación de condiciones de falla y ocurrencia de accidentes en intersecciones. Desarrollo de tácticas locales para evitar saturación de las intersecciones.

4. De Soporte Básico:

- Probabilidad y estadística.
- Tratamiento de series cronológicas. Pronósticos.
- Diseño de filtros para extraer información.
- Capacidad de flujo en la red urbana.

d) Subsistemas:

1. De programación y desarrollo.
2. De operación.
3. De mantenimiento.
4. De evaluación de resultados en la calle.

e) Partes funcionales:

1. Un conjunto de detectores, convenientemente situados dentro de la red bajo control, y que se encargan de medir la intensidad o volumen y la ocupancia.
2. Un conjunto de mandos locales encargados de hacer -- llegar a los semáforos existentes la forma en que de ben operar.
3. Estaciones concentradoras de datos de los detectores (Central de Detectores).
4. Unidades de envío de datos y recepción de órdenes. - (Estación Transmisora de Datos, ETD).
5. Computadoras de zona controlando, en forma autónoma- o de acuerdo con las instrucciones de la computadora

4. De Soporte Básico:

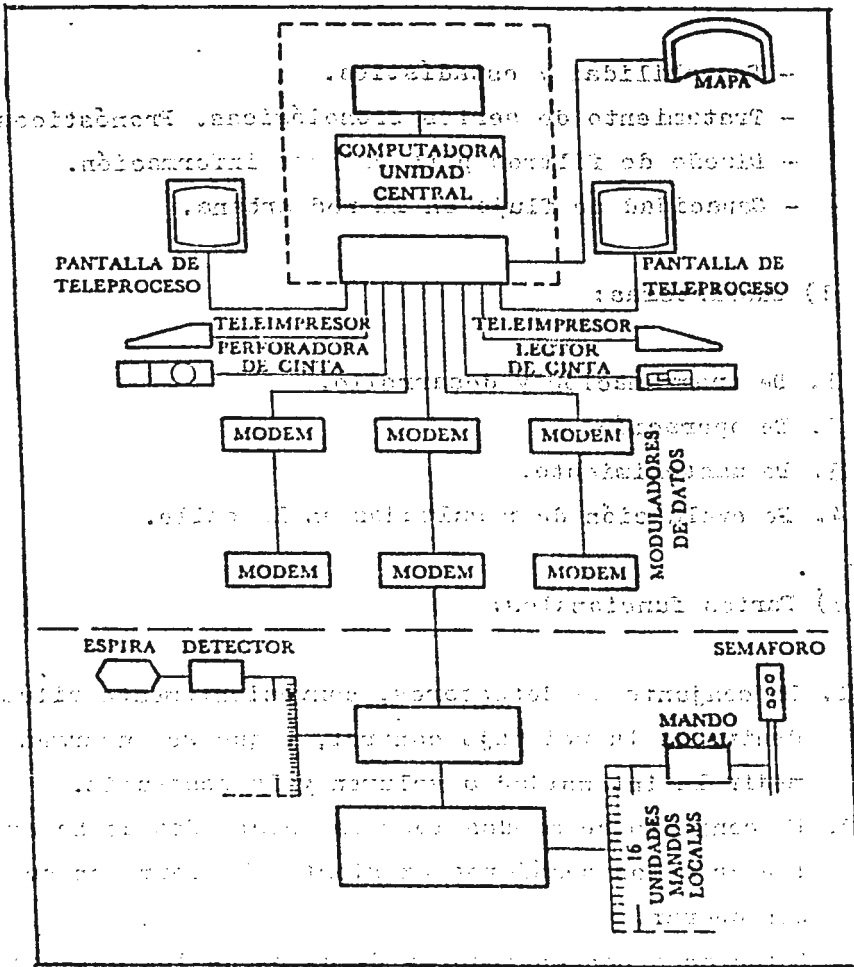


Fig. 4.1 Organización de los componentes de equipo que integran el Sistema COAUTRAN.

central, la operación de un conjunto de mandos locales.

6. Enlaces de comunicación por la vía telefónica desde el computador central hacia el computador de zona y viceversa.

7. Unidades Modem: un par por cada computador de zona.

8. Computador Central y equipo periférico, incluyendo: mapa representativo del estado de operación del sistema, teleimpresores, pantallas de teleproceso, lectora y perforadora de cinta de papel.

9. Enlace de comunicación con el mapa y con las unidades ETD en la calle.

Gráficamente, la organización del Sistema COAUTRAN queda representada en la figura 4.1.

EJEMPLO No. 4: PROGRAMACION LINEAL.

Supóngase que los Ferrocarriles Nacionales de México -- tienen la siguiente demanda mensual de locomotoras diesel para operar su sistema en todo el país.

Periodo	Locomotoras
	Diesel
1er. mes	750
2do. mes	800
3er. mes	780

La gerencia de los Ferrocarriles puede satisfacer su demanda mediante la combinación de las siguientes políticas:

- a) Uso de la existencia de locomotoras diesel que se tiene en estado funcional para ese mes.
- b) Comprar locomotoras al extranjero que se entregan de inmediato.
- c) Mandar reparar locomotoras a los talleres nacionales. El tiempo de reparación normal es de dos meses.
- d) Mandar reparar locomotoras a los talleres nacionales con carácter de extra urgente. El tiempo de reparación extra urgente es de un mes.

La política (b) tiene un costo de \$ 5 000 000 por locomotora; la (c) de \$ 50 000 por locomotora y la (d) de \$ 250 000 por locomotora.

Se supone que cada mes el 5% de las locomotoras tienen que darse a componer y que hay 1/2% de bajas, es decir, locomotoras tan viejas que ya no son reparables. El presupuesto para los próximos tres meses es de \$ 100 000 000 y se tienen al iniciar el primer mes 650 locomotoras en operación, 0 en reparación normal y 0 en reparación extra urgente.

Bajo estas condiciones, ¿qué combinación de políticas debe seguir la gerencia de los Ferrocarriles, para minimizar costos y satisfacer la demanda?

Se formula este problema como un programa lineal. Sea

$X_1 \geq 0$: la cantidad de locomotoras diesel que se com---

= (para en el mes i ($i = 1, 2, 3$), - $X_i + 650$

$Y_i \geq 0$: la cantidad de locomotoras diesel mandadas a re-
parar normalmente (en el mes i y que estarán dis-
ponibles en el mes $i + 2$ ($i = 1, 2, 3$),

$Z_i \geq 0$: la cantidad de locomotoras diesel mandadas a re-
parar en forma extra urgente en el mes i , y que
estarán disponibles en el mes $i + 1$ ($i = 1, 2, 3$).

Obviamente la función de costo a minimizar es:

$$\text{Min } Z = 5\,000\,000 \sum_{i=1}^3 X_i + 50\,000 \sum_{i=1}^3 Y_i + 250\,000 \sum_{i=1}^3 Z_i.$$

Durante el primer mes la demanda deberá satisfacerse de
la siguiente manera:

$$650 + X_1 = 750.$$

Al finalizar ese mes habrá un total de $X_1 + 650$ locomo-
toras diesel, 5% del cual pasará a reparación (normal o ex-
tra urgente) y 1/2% se dará completamente de baja. Esto quie-
re decir que el número de locomotoras a repararse es de:

$$Y_1 + Z_1 = 0.05(650 + X_1)$$

y el número total en operación es de:

$$650 + X_1 - 0.005(650 + X_1) - 0.005(650 + X_1) =$$

$$0.990(650 + X_1) = 0.990(650 + X_1)$$

$$0.945(650 + X_1)(1 - 0.055) = 0.945(650 + X_1)$$

Se supone que las locomotoras que se dan de baja provienen de las que se mandan a reparar.

La demanda en el siguiente mes se satisfará con la existencia, más compras, más reparaciones extra urgentes, es decir:

$$0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1 = 800.$$

Al fin de ese mes se tiene que el número de unidades a reparaciones de:

$$0.05 [0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1]$$

o sea

compra de unidades en el tercer mes se tiene que el número de unidades de:

$$Y_2 + Z_2 = 0.05 [0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1],$$

y el número total en operación al empezar el tercer mes es de:

$$0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1 - 0.05 [0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1]$$

$$- 0.005 [0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1]$$

o sea

$$OST = \sum X + OST$$

$$\left[0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1 \right] (1 - 0.05 - 0.005) =$$

$$OST = 0.945 \left[0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1 \right]$$

Para satisfacer la demanda del tercer y último mes se tiene la siguiente expresión:

$$0.945 \left[0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1 \right] + X_3 + Z_2 + Y_1 = 780.$$

Por último, las reparaciones del último mes serán:

$$Y_3 + Z_3 = 0.05 \left\{ 0.945 \left[0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1 \right] + X_3 + Z_2 + Y_1 \right\}$$

El presupuesto trimestral quedaría expresado como:

$$5 \times 10^6 \sum_{i=1}^3 X_i + 5 \times 10^4 \sum_{i=1}^3 Y_i + 2.5 \times 10^5 \sum_{i=1}^3 Z_i \leq 10^8.$$

En resumen el programa lineal (sin arreglar términos) sería:

$$\text{Min } Z = 5\,000\,000 \sum_{i=1}^3 X_i + 50\,000 \sum_{i=1}^3 Y_i + 250\,000 \sum_{i=1}^3 Z_i$$

sujeto a

$$650 + X_1 = 750$$

300 0

$$0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1 = 800$$

$$0.945 \left[0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1 \right] + X_3 + Z_2 + Y_1 = 780$$

$$Y_1 + Z_1 = 0.05(650 + X_1)$$

$$Y_2 + Z_2 = 0.05 \left[0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1 \right]$$

$$Y_3 + Z_3 = 0.05 \left\{ 0.945 \left[0.945(650 + X_1) + X_2 + Z_1 \right] + X_3 + Z_2 + Y_1 \right\}$$

$$5 \times 10^6 \sum_{i=1}^3 X_i + 5 \times 10^4 \sum_{i=1}^3 Y_i + 2.5 \times 10^5 \sum_{i=1}^3 Z_i \leq 10^8$$

$$X_i \geq 0, Y_i \geq 0, Z_i \geq 0, i = 1, 2, 3.$$

El siguiente paso sería arreglar los términos, agregar las variables de holgura que se requirieran para convertir las desigualdades en igualdades, y resolver el programa lineal resultante con el método simplex, por ejemplo. Pero debido a que el procedimiento manual del método simplex para este problema resulta demasiado extenso y laborioso, lo aconsejable sería buscarle solución por medio de un programa de computadora que ejecutara el problema lineal en un tiempo razonable.

El método simplex será desarrollado posteriormente durante la resolución de un problema lineal de tipo entero.

EJEMPLO No. 5: PROBLEMA DE TRANSPORTE. 07300

Supóngase que la flota de Aeroméxico consiste de 3 tipos de aviones (DC-10, DC-9 y DC-8), y la compañía opera 100 rutas diferentes por día. Se tienen 3 DC-10, 15 DC-9 y 25 DC-8. Supóngase que se dispone del pronóstico de la demanda del día k ($k = 1, 2, \dots, 365$) en la ruta j ($j = 1, 2, \dots, 100$). Por ejemplo para el día 24 de octubre se ha pronosticado lo siguiente:

DEMANDA (en pasajeros)

Ruta	Trayecto	Número de pasajeros
1	México-N. York	355
2	N. York-México	410
.	.	.
.	.	.
.	.	.
100	Acapulco-México	630

Tabla 4.1

Supóngase que la compañía ha estudiado los costos de operación de un avión tipo i ($i = \text{DC-10, DC-9, DC-8}$), asignado a una ruta j ($j = 1, 2, \dots, 100$). Por ejemplo:

COSTO (en pesos por ruta)

Ruta	Trayecto	DC-10	DC-9	DC-8
1	México-N. York	50 000	no opera	35 000
2	N. York-México	60 000	no opera	38 000
100	Acapulco-México	no opera	5 000	7 500

Tabla 4.2

Además, la compañía conoce el número total de pasajeros que se pueden acomodar en un avión tipo i ($i = DC-10, DC-9, DC-8$) en la ruta j ($j = 1, 2, \dots, 100$). Por ejemplo:

CAPACIDAD DE TRANSPORTE (en pasajeros)

Ruta	Trayecto	DC-10	DC-9	DC-8
1	México-N. York	300	no opera	150
2	N. York-México	300	no opera	150
100	Acapulco-México	no opera	115	150

Tabla 4.3

La compañía desea saber el número de aviones tipo i ($i = \text{DC-10, DC-9, DC-8}$), que se necesitan asignar en la ruta j ($j = 1, 2, \dots, 100$) en un determinado día k ($k = 1, 2, \dots, 365$), con el objeto de minimizar costos de transporte; pero atendiendo a las restricciones de demanda, de capacidad de flota y de capacidad de pasajeros por avión.

Un problema de este tipo puede formularse como un programa de programación lineal si se hacen las siguientes consideraciones. Sea, para un determinado día k ($k = 1, 2, \dots, 365$):

- X_{ij} : la variable de decisión que mide el número de aviones del tipo i ($i = \text{DC-10, DC-9, DC-8}$) asignados a la ruta j ($j = 1, 2, \dots, 100$);
- a_{ij} : el número de aviones tipo i ($i = \text{DC-10, DC-9, DC-8}$) que se dispone en la flota de Aeroméxico;
- b_j : el número de pasajeros a transportar en la ruta j ($j = 1, 2, \dots, 100$);
- c_{ij} : el costo de operación de un avión tipo i ($i = \text{DC-10, DC-9, DC-8}$) en la ruta j ($j = 1, 2, \dots, 100$);
- p_{ij} : el número de pasajeros que caben en un avión tipo i ($i = \text{DC-10, DC-9, DC-8}$) en la ruta j ($j = 1, 2, \dots, 100$).

El problema que se necesita resolver para el día k es:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{100} c_{ij} X_{ij}$$

sujeto a

$$\sum_{i=1}^{100} x_{ij} \leq a_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 100$$

$$\sum_{j=1}^{100} p_{ij} x_{ij} \geq b_j, \quad j = 1, 2, \dots, 100$$

$$x_{ij} \geq 0$$

Y debido a las características que este problema presenta; se requiere resolver 365 diferentes problemas de estructura semejante, uno por cada día considerado.

Este tipo de problema lineal constituye un problema de transporte y tiene métodos propios de solución que son más eficientes que el método simplex.

Como puede notarse, el tratar de resolver manualmente este problema es una tarea que no se antoja práctica. Una vez más requerimos del potencial de una computadora para que ésta se encargue de hacer los cálculos y busque la solución óptima. Y en vista de que un problema de transporte es muy similar a un problema de asignación, mejor pasemos a la resolución de un problema de este último tipo.

EJEMPLO No. 6: PROBLEMA DE ASIGNACION.

Supóngase que Aeroméxico tiene el siguiente horario de vuelos diarios México-Río de Janeiro.

Salida México **Vuelo** **Llegada Río de Janeiro**

6:00 A 12:00
 7:30 B 13:30
 11:30 C 17:30
 19:00 D 1:00
 0:30 E 6:30

Llegada México **Vuelo** **Salida Río de Janeiro**

11:30 1 5:30
 15:00 2 9:00
 21:00 3 15:00
 0:30 4 18:30
 6:00 5 00:00

El problema que tiene Aeroméxico, es la calendarización de la tripulación en estos vuelos. Resulta que una tripulación que sale de México un lunes a las 7:30 horas, llega a Río de Janeiro el mismo lunes a las 13:30 horas; sale el martes de Río a las 9:00 horas y llega a México a las 15:00 horas; cobra desde el lunes a las 7:30 horas hasta el martes a las 15:00 horas. El tiempo transcurrido desde las 13:30 horas del lunes hasta las 9:00 horas del martes siguiente, es un tiempo muerto. Se trata entonces de reducir los tiempos muertos de las tripulaciones en estos vuelos, sujeto a ciertas condiciones. En este caso, las condiciones son que cada-

tripulación debe descansar al menos 8 horas, pero no más de 24.

El problema se puede enunciar de la siguiente manera: - dónde deben vivir las tripulaciones y qué tripulaciones deben asignarse a qué vuelos, tal que los tiempos muertos totales se minimicen y al mismo tiempo se respeten las condiciones de descanso de las tripulaciones.

Supóngase una tripulación que vive en la ciudad de México, que trabaja en el vuelo C y regresa en el vuelo 2 de Río de Janeiro. De acuerdo con los tiempos de vuelo, esa tripulación llega a las 17:30 horas y sale a las 9:00 horas de la mañana rumbo a México, tras 15 y media horas de tiempo muerto. En cambio, una tripulación que vive en Río y sale en el vuelo 1 hacia México, y regresa en el vuelo A a Río, tiene un tiempo muerto de 18 y media horas. Así se pueden construir 2 matrices de tiempos muertos, a saber:

MATRIZ I: Tiempos muertos teóricos para tripulaciones - con sede en México (horas).

	1	2	3	4	5
A	17.5	21.0	3.0	6.5	12.0
B	16.0	19.5	1.5	5.0	10.5
C	12.0	15.5	21.5	1.0	6.5
D	4.5	8.0	14.0	17.5	23.0
E	23.0	2.5	8.5	12.0	17.5

MATRIZ (II): Tiempos muertos teóricos para tripulaciones - con sede en Río de Janeiro (horas).

	B	C	D	E	F
A	18.5	15.0	9.0	5.5	0.0
B	20.0	16.5	10.5	7.0	1.5
C	0.0	20.5	14.5	11.0	5.5
D	7.5	4.0	22.0	18.5	13.0
E	13.0	9.5	3.5	0.0	18.5

($M = 24 - M$) $M > 0$ en caso de ser necesario

Dadas estas dos matrices, se construye una nueva, donde los elementos t_{ij} serán $t_{ij} = \min(t_{ijI}, t_{ijII})$, siempre y cuando $8 \leq t_{ij} \leq 24$. En caso de que t_{ij} no cumpla con esta restricción, la asignación (i, j) es imposible y por lo tanto, $t_{ij} = M$, donde $M > 0$. En efecto, la nueva matriz es:

	1	2	3	4	5
A	17.5	15.0	9.0	M	12.0
B	16.0	16.5	10.5	M	10.5
C	12.0	15.5	14.5	11.0	M
D	M	8.0	14.0	17.5	13.0
E	13.0	9.5	8.5	12.0	17.5

A esta matriz se le aplica el método de solución para problemas de asignación (método húngaro) descrito en la sección 1.3.1.1.4 del primer capítulo.

Los pasos del método húngaro son los siguientes:

Paso 1. Ceros en cada columna. ($M - t_{ij} = M$).

(Aunque el orden de los ceros no es relevante)

	1	2	3	4	5
A	5.5	7.0	0.5	M	1.5
B	4.0	8.5	2.0	M	0.0
C	0.0	7.5	6.0	0.0	M
D	M	0.0	5.5	6.5	2.5
E	1.0	1.5	0.0	1.0	7.0

Ceros en cada fila. ($M - t_{ij} = M$).

Al hacer los ceros en cada fila, se obtiene el siguiente cuadro:

	1	2	3	4	5
A	5.0	6.5	0.0	M	1.0
B	4.0	8.5	2.0	M	0.0
C	0.0	7.5	6.0	0.0	M
D	M	0.0	5.5	6.5	2.5
E	1.0	1.5	0.0	1.0	7.0

Paso 2. Posible asignación:

- A - 3
- B - 5
- C - 4
- D - 2

Como las rutas E y 1 no han sido asignadas, se continúa en el paso 3.

-- mayiv ebrab sá gonimret ne sup enoit se asfalsigro acorit
Pasos 3-1 a 3-5.

tas culitá sácomenias al penchosingret adf

		1	2	3	4	5
X	A	5.0	6.5	0.0	M	1.0
	B	4.0	8.5	2.0	M	0.0
	C	0.0	7.5	6.0	0.0	M
	D	M	0.0	5.5	6.5	2.5
X	E	1.0	1.5	0.0	1.0	7.0

Paso 3-6.

		1	2	3	4	5
	A	4.0	5.5	0.0	M	0.0
	B	4.0	8.5	3.0	M	0.0
	C	0.0	7.5	7.0	0.0	M
	D	M	0.0	6.5	6.5	2.5
	E	0.0	0.5	0.0	0.0	6.0

Paso 2. Nueva asignación:

- A - 3 con tiempo muerto de 9 horas,
- B - 5 con tiempo muerto de 10.5 horas,
- C - 1 con tiempo muerto de 12 horas,
- D - 2 con tiempo muerto de 8 horas,
- E - 4 con tiempo muerto de 12 horas.

Esta asignación es óptima. Refiriéndonos a las dos ma--

trices originales se tiene que en términos de donde viven --
 las tripulaciones la asignación óptima es:

X
 Tabla 4.4

Vuelo	Proviene de	Observaciones
A - 3	Matriz II	Sale Río 15 h. Llega México 21 h. (DIA 1) Sale México 6 h. Llega Río 12 h. (DIA 2)
B - 5	Matriz I	Sale México 7:30 h. Llega Río 13:30 h. - (DIA 1) Sale Río 00:00 h. Llega México 6:00 h. - (DIA 2)
C - 1	Matriz I	Sale México 11:30 h. Llega Río 17:30 h. - (DIA 1) Sale Río 5:30 h. Llega México 11:30 h. - (DIA 2)
D - 2	Matriz I	Sale México 19:00 h. Llega Río 1:00 h. - (DIA 1) Sale Río 9:00 h. Llega México 15:00 h. - (DIA 2)
E - 4	Matriz I	Sale México 0:30 h. Llega Río 6:30 h. -- (DIA 1) Sale Río 18:30 h. Llega México 0:30 h. - (DIA 2)

El tiempo muerto total mínimo es de 51.5 horas. El número total de diferentes combinaciones de asignación de tripulantes a vuelos en este problema es de 5!, o sea, 120.

EJEMPLO No. 7: REDES DE OPTIMIZACION (FLUJO MAXIMO EN UNA RED).

Sea una red de transporte compuesta por calles y avenidas (figura 4.2) con las capacidades de sus arcos indicadas en vehículos/minuto y una velocidad promedio común a toda la red.

Primeramente obtendremos el flujo óptimo en esta red, utilizando el algoritmo de Ford y Fulkerson.

Observamos en la figura 4.2, que en la red pueden diferenciarse fácilmente dos flujos sobrepuestos: uno con dirección Poniente-Oriente, y el otro con dirección Oriente-Poniente. Resolver la red considerando un solo flujo total presentaría ciertas complicaciones que pueden evitarse, sin incurrir en un error muy grande en los resultados finales, resolviendo la red independientemente para cada uno de los flujos que podemos distinguir, y sobreponiendo ambos resultados para obtener así el flujo óptimo de toda la red.

Los flujos en estudio, ya separados, seguirán las dos redes independientes representadas en las figuras 4.3 y 4.4, respectivamente.

Por simplicidad se ha tomado únicamente un solo sentido en los arcos de doble sentido, sin eliminar con ello la posibilidad de considerar el otro sentido cuando fuese necesario.

Aplicando el algoritmo de Ford y Fulkerson a la red con dirección Poniente-Oriente tenemos:

1. Se hace pasar un flujo cualquiera (por ejemplo 100 unida-

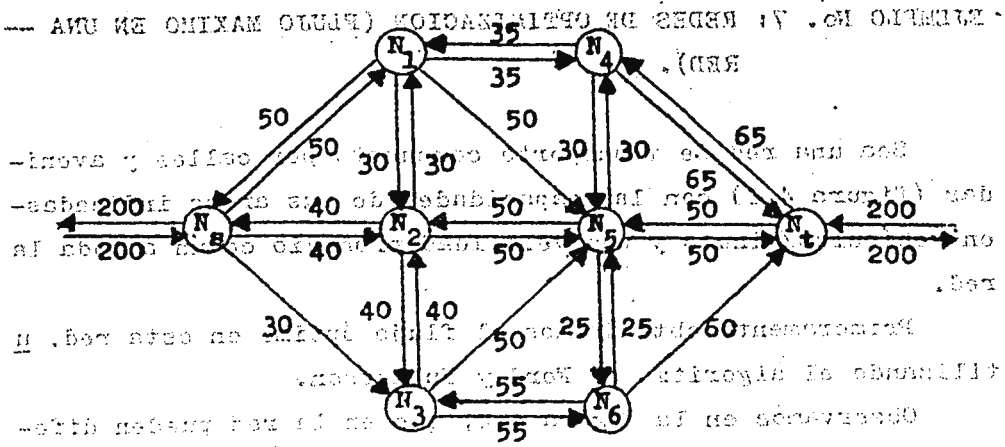


Fig. 4.2 Red de transporte (capacidades).

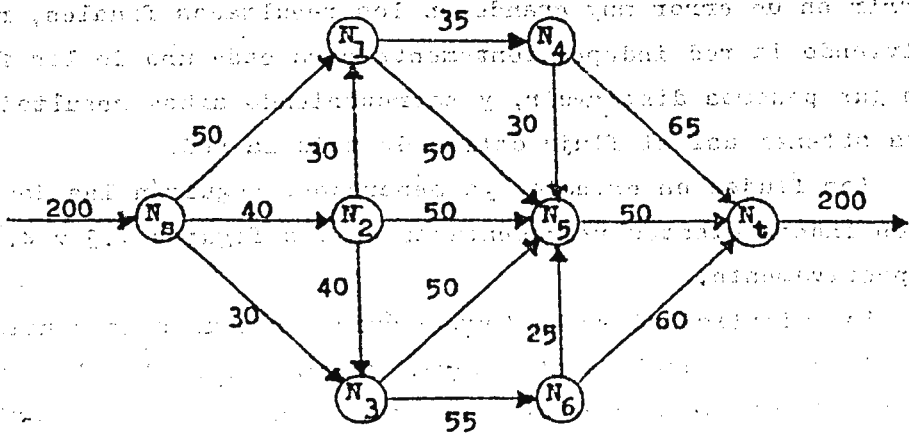


Fig. 4.3 Flujo Poniente-Oriente. (capacidades).

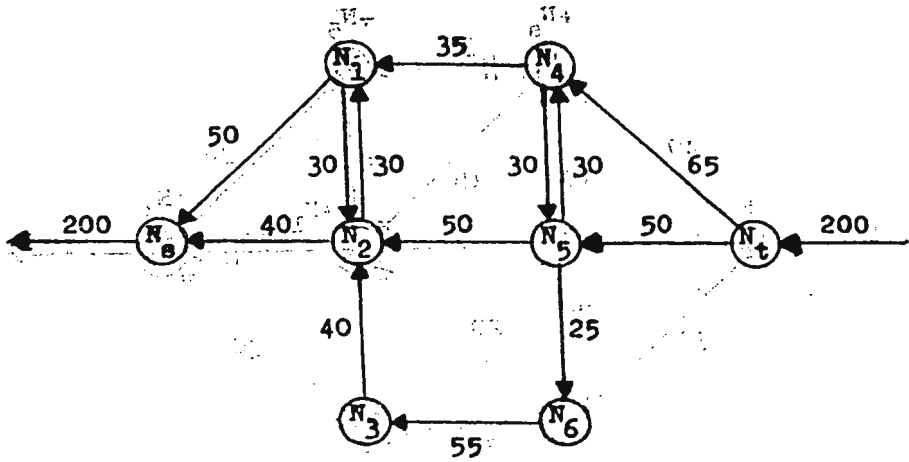


Fig. 4.4 Flujo Oriente-Poniente.
(capacidades).

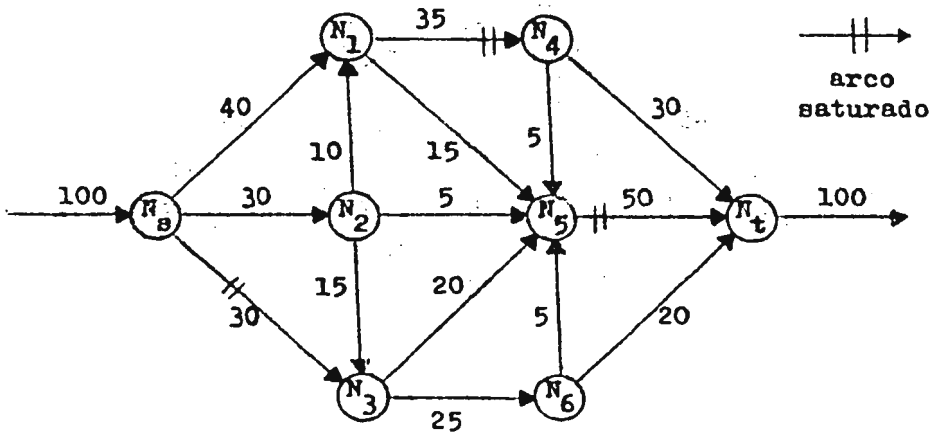


Fig. 4.5 Flujo Poniente-Oriente con 100 unidades.

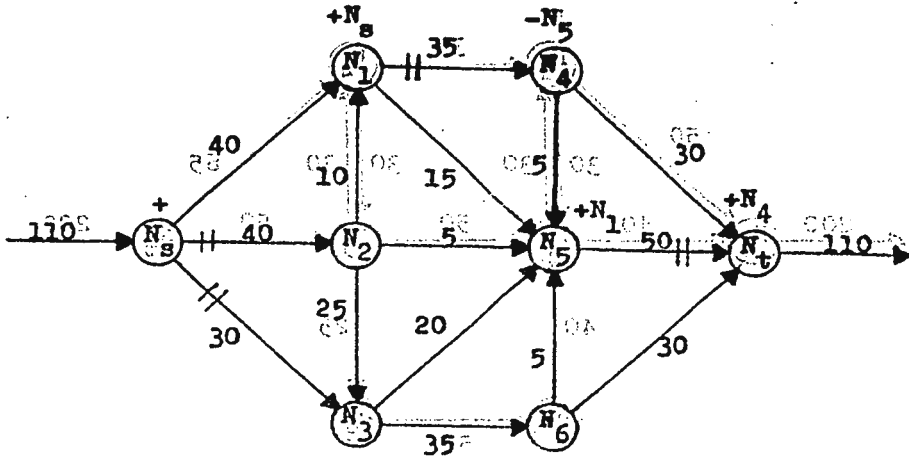


Fig. 4.6 Flujo Poniente-Oriente.

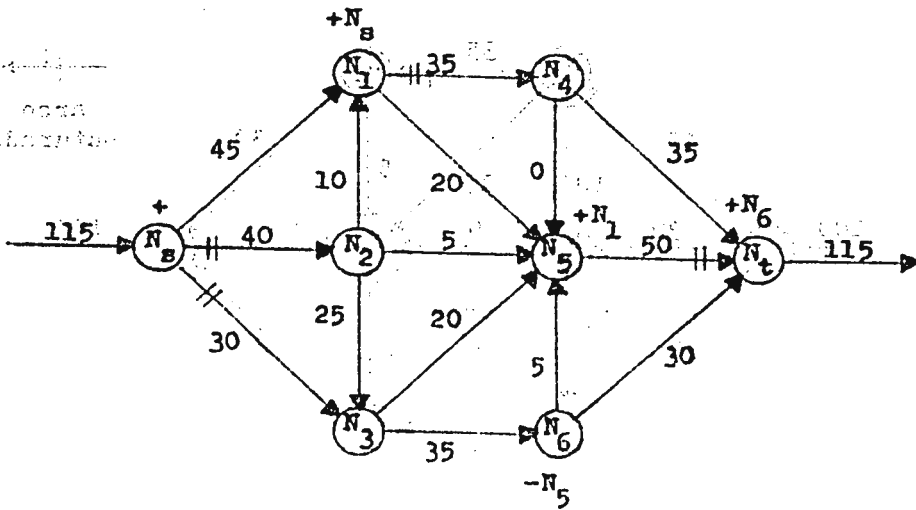


Fig. 4.7 Flujo Poniente-Oriente.

- des), por la red (figura 4.5).
2. Se hace que este flujo sea completo, obligando que cada camino que vaya del nodo fuente al nodo destino, tenga por lo menos un arco saturado (con flujo igual a su capacidad) (figura 4.6).
 3. Se marca el nodo fuente con signo (+) (figura 4.6).
 4. Si el nodo N_i está marcado y el arco A_{ij} no está saturado, se marca el nodo N_j con $(+N_i)$ (figura 4.6).
 5. Si N_j está marcado y N_i no lo está, y además en el arco A_{ij} se tiene un flujo no nulo, se marca con $(-N_j)$ el nodo N_i (figura 4.6).
 6. Se repiten los pasos 4 y 5 en toda la red hasta lograr marcar el nodo destino. Si esto es posible, la cadena que une nodos marcados positiva o negativamente puede ser modificada en su flujo de la siguiente manera:
 - 1o. Incrementando una cierta cantidad "M" del flujo en los arcos que siguen el sentido de la cadena, y
 - 2o. Restando esa misma cantidad "M" en los arcos que siguen el sentido contrario. (En este problema se toma $M = 5$ unidades).

Con las nuevas cantidades de flujo se repiten los pasos 4 y 5 hasta lograr marcar de nuevo el nodo destino. Se modifican otra vez los flujos y se continúa así hasta que ya no sea posible marcar el nodo destino. En ese momento, se tiene el flujo máximo de la red (figura 4.7).

Al modificar con 5 unidades la cadena $N_5, A_{51}, N_1, A_{15}, N_5, A_{65}, N_6, A_{6t}, N_t$ observamos (figura 4.8) que el arco A_{51} queda saturado, siendo imposible continuar la marcación a partir de N_5 , por lo tanto, tenemos un flujo máximo en la red que resulta ser de 120 unidades (vehículos/minuto).

Procediendo de igual manera, podemos obtener el flujo máximo de tránsito en la red de dirección Oriente-Occidente, el cual resulta de 90 vehículos/minuto (figura 4.9).

Ahora veamos qué efectos produce en esta red la interrupción temporal de alguno de los arcos-calles y cómo se redistribuye el flujo óptimo del tránsito.

Si los arcos A_{15} y A_{25} dejaran de funcionar, se nos presentaría la situación mostrada en las figuras 4.10 y 4.11.

Veamos cómo afecta al flujo máximo tal interrupción en cada caso, considerando las figuras 4.12 y 4.13 respectivamente.

Observamos que en ningún caso podemos marcar el respectivo nodo destino, por lo tanto, tenemos ya los flujos máximos posibles en las dos redes. La tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos para cada situación.

Por último, en base a estos resultados podemos hacer las siguientes recomendaciones:

Si la interrupción de los arcos-calles es de corta duración y se cuenta con un registro confiable de aforos de tránsito, entonces se puede llevar ésta a cabo en un intervalo (a una hora del día o durante una temporada del año), en que el flujo real de vehículos no exceda, con un buen margen de

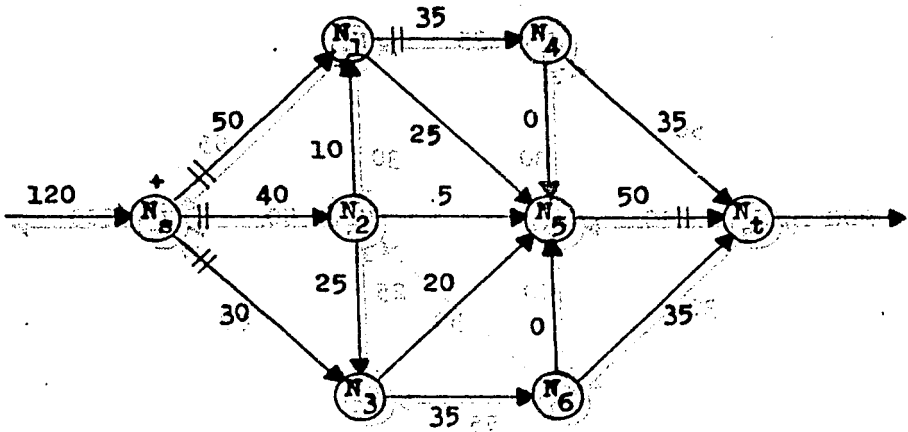


Fig. 4.8 Flujo Poniente-Oriente.

(de Sur a Norte)

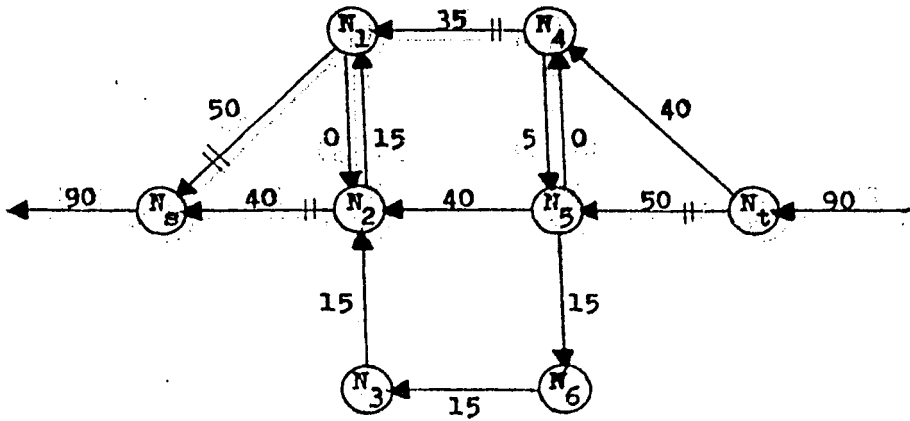


Fig. 4.9 Flujo Oriente-Poniente.

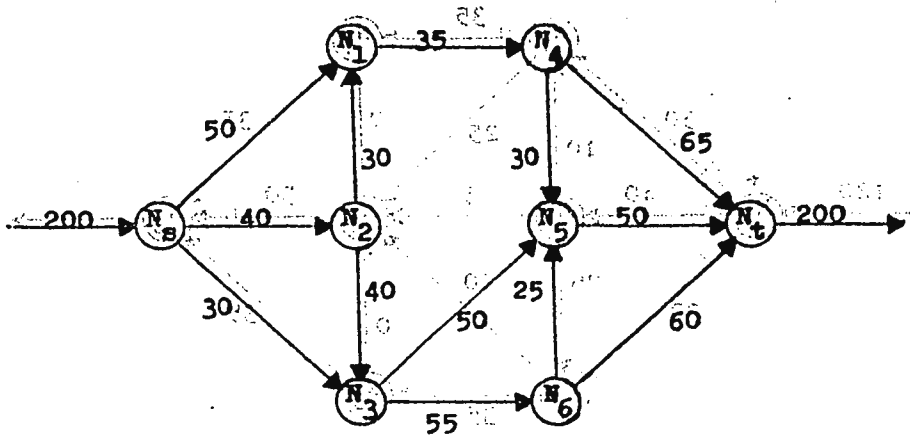


Fig. 4.10 Flujo Poniente-Oriente.
(capacidades).

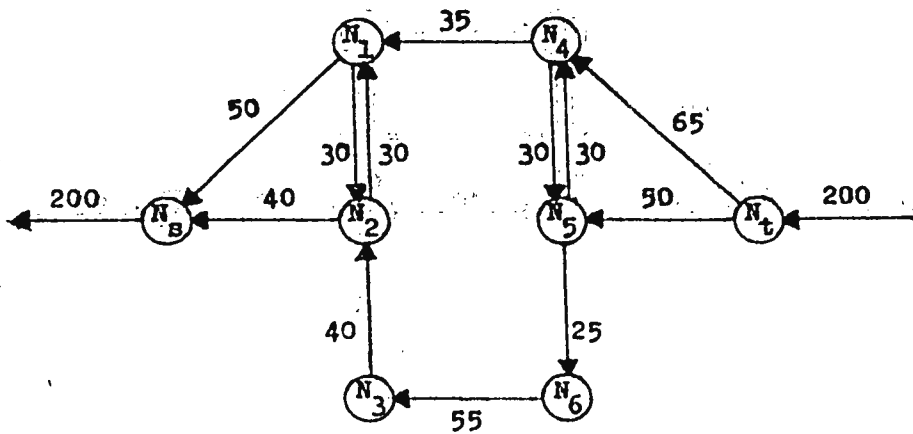


Fig. 4.11 Flujo Oriente-Poniente
(capacidades).

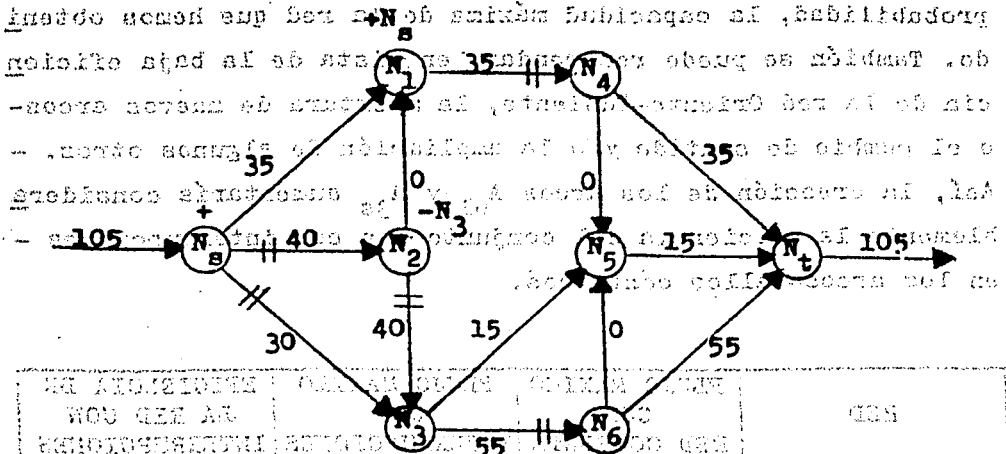


Fig. 4.12 Flujo Poniente-Oriente.

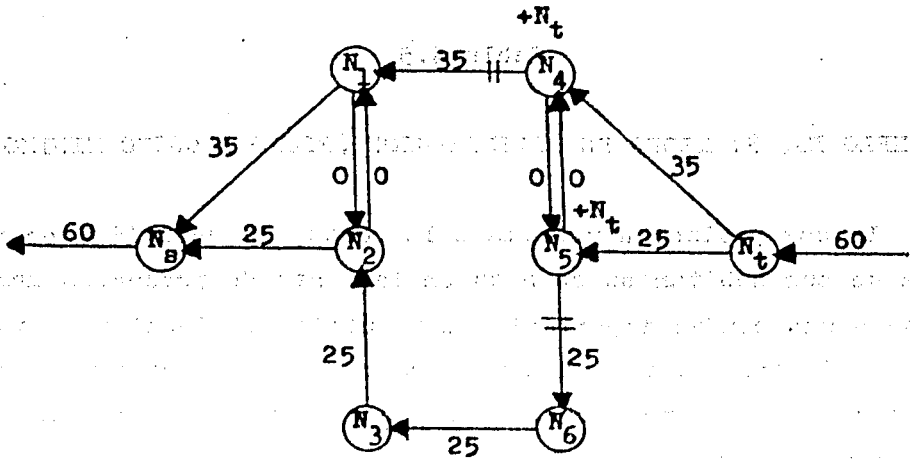


Fig. 4.13 Flujo Oriente-Poniente.

probabilidad, la capacidad máxima de la red que hemos obtenido. También se puede recomendar, en vista de la baja eficiencia de la red Oriente-Poniente, la apertura de nuevos arcos o el cambio de sentido y/o la ampliación de algunos otros. - Así, la creación de los arcos A_{61} y A_{38} aumentaría considerablemente la eficiencia del conjunto aun con interrupciones - en los arcos-calles céntricos.

RED	PLUJO MAXIMO CON RED COMPLETA	PLUJO MAXIMO CON INTERRUPCIONES	EFICIENCIA DE LA RED CON INTERRUPCIONES
Poniente-Oriente	120	105	87.5%
Oriente-Poniente	90	60	66.6%
Total	210	165	78.5%

Tabla 4.5

EJEMPLO No. 8: REDES DE OPTIMIZACION (PLUJO A COSTO MINIMO).

En una población próxima a la costa, la actividad económica de sus habitantes se basa en la venta de productos marítimos a una ciudad importante. Esta última se localiza a varios kilómetros tierra adentro y representa el principal consumidor de tales productos. Ambos conglomerados se hallan comunicados por una red de carreteras como la mostrada en la figura 4.14.

Debido a que los productos marítimos no deben permanecer mucho tiempo en los vehículos que los transportan, el --

— este abiaq̄r abm stur si r̄obilitate no et̄ar̄noe arelebr̄y
 r̄obilitateo et̄ar̄noe se y r̄et̄ar̄ber̄t̄ or̄iḡnoe lo

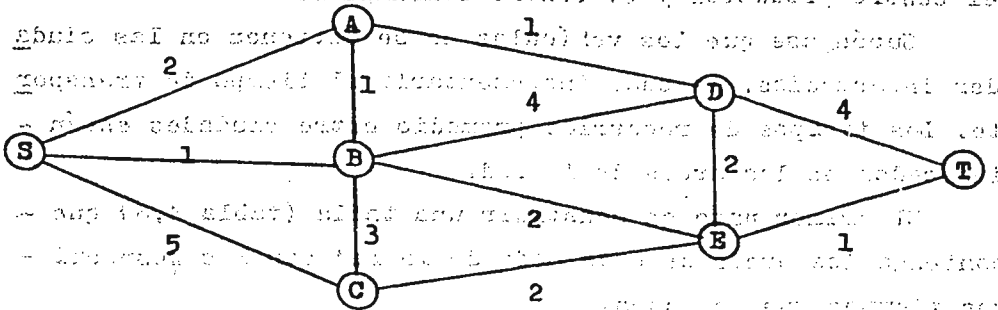


Fig. 4.14 Red de carreteras

	2	1		3	3	4
S	A	B	C	D	E	T
(S)1	AB1	(B)1	CB2	DA1	EC3	
(S)2	(A)1	(B)2	CB3	DE2	EB2	
SC5		BC3		DB4	ED2	
		BE4		DT4	(E)2	

Tabla 4.6

problema consiste en identificar la ruta más rápida entre -- el centro productor y el centro consumidor.

Supóngase que los vehículos no se detienen en las ciudades intermedias, lo cual incrementaría el tiempo de transporte. Los tiempos de recorrido promedio entre ciudades están -- indicados en los arcos de la red.

El primer paso es construir una tabla (tabla 4.6) que -- contenga los arcos de cada nodo de la red con los respectivos tiempos que los unen.

En este caso, el costo mínimo se traduce al tiempo mínimo de transporte ya que este consigue que los productos lleguen a su destino sin descomponerse.

El algoritmo que debe seguirse es el siguiente:

1. Se identifica el nodo más cercano al nodo fuente; se eliminan de las otras columnas los arcos que conectan este -- nodo y se marca sobre éste la distancia al nodo fuente.
2. Luego es necesario que se busque el segundo nodo más cercano al nodo fuente, que se escriba sobre este nodo la -- distancia total al nodo fuente, que se eliminen los arcos que conectan este nodo y que se marque una "x" sobre la -- columna cuyos arcos estén todos marcados.
3. Se buscará cada vez más entre los nodos más cercanos a -- los últimos nodos escogidos y se repetirá la operación -- hasta que todas las columnas de la tabla tengan una "x".

La ruta más corta que resulta de aplicar este algoritmo es: S - B - E - T, con un tiempo mínimo de 4 horas.

EJEMPLO No. 9: PROGRAMACION DINAMICA.

Supongamos que se necesita transportar combustible de la ciudad S a la ciudad T (figura 4.15); las dos ciudades están unidas por una red de carreteras que pasa por 8 ciudades intermedias. El objetivo es encontrar la ruta que minimice los costos. No se permite retroceder de una etapa a la anterior.

Una manera de resolver este problema sería por medio de algún método de redes de flujo a costo mínimo, como el del ejemplo anterior. Pero como se trata de una situación que puede ser dividida en etapas, es posible aplicar un algoritmo de programación dinámica para obtener de modo eficiente la solución.

Este problema de transporte de combustible tiene cinco etapas que constan de los estados (o ciudades) (S), (A, B, C), (D, E, F), (G, H) y (T), respectivamente. Cada decisión escoge qué ciudad se visitará en la etapa siguiente. Nótese que el análisis comienza por la última etapa; a continuación se van agregando etapas hasta incluir todo el problema. Se puede notar que este método obtiene la mejor solución así como la segunda, la tercera, etc. Este es uno de los objetivos finales de la Investigación de Operaciones: obtener el valor relativo de todas las alternativas factibles.

Uno de los algoritmos que pueden seguirse para resolver el problema presentado en la figura 4.15 es el siguiente:

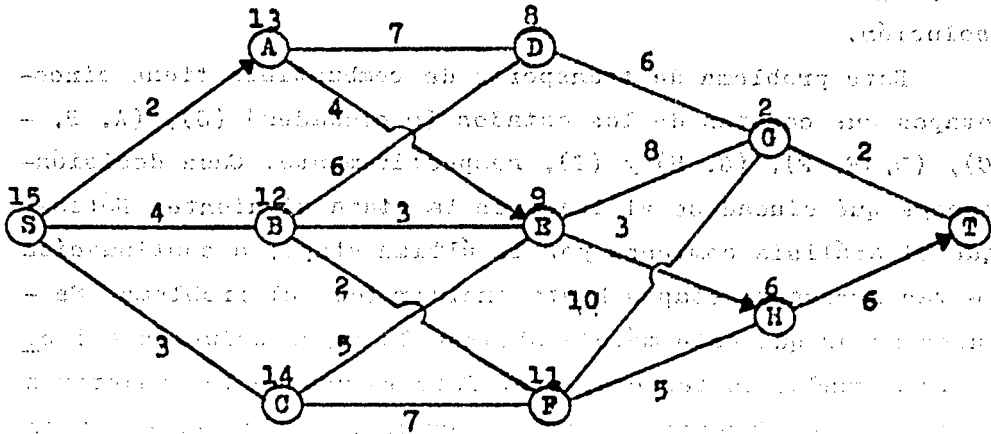
1. Se determinan las rutas más cortas al nodo G y al nodo H;

se escriben las distancias mínimas sobre los nodos.

2. Analizamos las rutas entre las etapas (2) y (3). Las distancias mínimas a los nodos D, E y F son $6 + 2 = 8$, $6 + 3 = 9$ y $5 + 6 = 11$, respectivamente. Escribimos estas distancias sobre los nodos correspondientes.
3. Sigase este procedimiento hasta que se llegue al nodo fuente.
4. Se retrocede, comenzando con la etapa (5) y se continúa la ruta de distancia mínima.

El resultado de este problema es seguir la ruta óptima

S - A - E - H - T, con un recorrido mínimo de 15 kilómetros.



Etapas

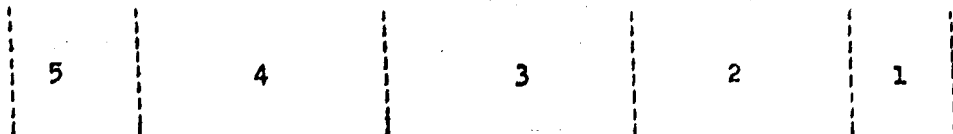


Figura 4.13

EJEMPLO No. 10: PROGRAMACION ENTERA (1).

$$Z(X_{1SD} + X_{1TD})$$

En una ciudad o zona urbana se puede estimar con relativa exactitud y en cada una de cinco colonias, la demanda --- (personas/día) que tendría un sistema urbano de transportes--- rápido (un tren subterráneo, etc.), que transportara personas al y del centro principal de la ciudad sin ninguna parada intermedia. Suponiendo que existen 20 posibles localidades para las terminales de tal sistema en las colonias, y suponiendo que se conoce la capacidad de transporte del sistema, ¿cómo se podría utilizar un modelo de programación entera para determinar la configuración del sistema que minimizara los costos totales, o sea, la localización de las terminales (estaciones) en las colonias de la ciudad? Supóngase que una vez escogida una terminal, sólo existe una ruta al centro de la ciudad; se conoce el costo promedio de esa terminal, así como el gasto promedio que los habitantes de las colonias tienen para llegar a cada posible terminal.

En este problema se debe notar que cada localidad de terminal factible supone dos tipos de costos: los costos de su construcción, así como los de la ruta (ya establecida para cada posible terminal) al centro de la ciudad y los gastos de los habitantes de ciertas colonias para llegar a terminales. Los llamaremos $C1_1$ y $C2_1$, respectivamente. La capacidad de transporte de la terminal "1" al centro de la ciudad sería a_1 .

Por lo tanto, la formulación del problema sería:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^{20} (C1_i + C2_i) X_i$$

El problema de programación lineal que se plantea es el siguiente:

Sujeto a: $\sum_{i=1}^{20} a_i X_i \geq D_t; t = 1, 2, \dots, 5$ y la capacidad de cada terminal $X_i = 0, 1$; donde $X_i = 0$ significa que la terminal "i" se escoge (0) o se rechaza (1). Deben existir las restricciones de desigualdades para que la demanda de transporte proyectada en cada colonia "t" se satisfaga con la instalación de terminales "i". Nótese que el número de productos $a_i X_i$ en cada una de estas restricciones depende del número de terminales en cada colonia.

Si también se desea determinar la capacidad de cada línea (terminal y ruta al centro) de este sistema, se podría aplicar el modelo anterior; pero únicamente sería necesario que se aumentara el número de variables X_i ; es decir, para cada posible ruta anterior, habrían ahora tres alternativas (tres variables X_i).

Si además suponemos que existen tres posibles rutas de cada posible terminal al centro de la ciudad, también se podría incluir en el modelo anterior la modificación correspondiente, aumentando el número de variables X_i ; o sea, que para cada posible ruta de cierta capacidad, habrían ahora tres alternativas (tres variables X_i) más.

EJEMPLO No. 11: PROGRAMACION ENTERA (2)

Una compañía de transporte dispone de \$ 400 000 para -- comprar nuevo equipo, y está considerando tres tipos de vehí- culo. El vehículo A puede transportar 10 toneladas y se espe- ra que promedie 35 millas por hora. Su costo es de \$ 8 000.-- El vehículo B tiene una capacidad de 20 toneladas y se espe- ra que promedie 30 millas por hora. Su costo es de \$ 13 000. El vehículo C es un modelo modificado de B; tiene un sitio -- para que duerma un chofer, lo cual reduce su capacidad a 18- toneladas y eleva su costo a \$ 15 000.

El vehículo A requiere una tripulación de un hombre y, -- si se opera durante tres turnos por día, puede trabajar un -- promedio de 18 horas por día. Los vehículos B y C requieren -- una tripulación de dos hombres cada uno, pero mientras que B -- se puede trabajar 18 horas por día en tres turnos, C puede -- promediar 21 horas diarias. La compañía dispone de 150 chofe- res al día y tendría muchas dificultades para obtener tripu- laciones adicionales. Las facilidades de mantenimiento son -- tales que el número total de vehículos no puede exceder de -- 30. ¿Cuántos vehículos de cada tipo deberán comprarse si la -- compañía desea hacer máxima su capacidad en toneladas-millas -- por día?

Si se define

- X_1 : número de vehículos tipo A.
- X_2 : número de vehículos tipo B.
- X_3 : número de vehículos tipo C.

La función objetivo del problema es: $Z = 6(10)(35)(18)X_1 + 10(20)(30)(18)X_2 + 11(18)(30)(21)X_3$

$$Z = 6(10)(35)(18)X_1 + 10(20)(30)(18)X_2 + 11(18)(30)(21)X_3$$

y las restricciones son:

$$8\,000 X_1 + 13\,000 X_2 + 15\,000 X_3 \leq 400\,000$$

$$X_1 + X_2 + X_3 \leq 30$$

$$(1)(3)X_1 + (2)(3)X_2 + (2)(3)X_3 \leq 150$$

$$X_1 \geq 0; X_2 \geq 0; X_3 \geq 0$$

Pero, debido a que los vehículos que se van a comprar son unidades enteras, el problema tiene que arreglarse en un programa entero de la siguiente manera:

$$\text{Max } Z = 6\,300 X_1 + 10\,800 X_2 + 11\,340 X_3$$

sujeeto a

$$8\,000 X_1 + 13\,000 X_2 + 15\,000 X_3 \leq 400\,000$$

$$X_1 + X_2 + X_3 \leq 30$$

$$3 X_1 + 6 X_2 + 6 X_3 \leq 150$$

$$x_1 \geq 0; x_2 \geq 0; x_3 \geq 0$$

y x_1, x_2, x_3 son enteros.

Recordando que los algoritmos para resolver programas enteros comienzan con la resolución del programa lineal correspondiente, es decir, con la solución del problema entero despreciando las restricciones de integridad; debemos hacer uso del método simplex descrito en la sección 1.3.1.1.2.

Siguiendo el método simplex tenemos:

Paso 1: Consiste en escribir el problema lineal en su forma canónica. (Este paso ya lo hemos efectuado).

Pasos 2 y 3:

$$Z - 6\,300 x_1 - 10\,800 x_2 - 11\,340 x_3 = 0$$

$$8\,000 x_1 + 13\,000 x_2 + 15\,000 x_3 + x_4 = 400\,000$$

$$3 x_1 + 6 x_2 + 6 x_3 + x_5 = 150$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_6 = 30$$

$$x_1 \geq 0; x_2 \geq 0; x_3 \geq 0; x_4 \geq 0; x_5 \geq 0; x_6 \geq 0$$

Pasos 4 al 7:

Haciendo operaciones matriciales elementales tenemos el

siguiente desarrollo:

$$0 \leq X_1 \leq 10; 0 \leq X_2 \leq 20; 0 \leq X_3 \leq 20$$

Tabla 4.7

	Z	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Z_0
	1	-6 300	-10 800	-11 340	0	0	0	0
a_4	0	8 000	13 000	15 000	1	0	0	400 000
a_5	0	3 000	6 000	6 000	0	1	0	150 000
a_6	0	1 000	1 000	1 000	0	0	1	30 000
	1	-630	540	0	0	1 890	0	283 500
a_4	0	500	-2 000	0	1	-2 500	0	25 000
a_3	0	1/2	1	1	0	1/6	0	25
a_6	0	1/2	0	0	0	-1/6	1	5
	1	0	540	0	0	1 680	1 260	289 800
a_4	0	0	-2 000	0	1	-14 000/6	-1 000	20 000
a_3	0	0	1	1	0	1/3	-1	20
a_1	0	1	0	0	0	-1/3	2	10

Por lo tanto, los valores de las variables X_1 , $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$; son:

$$X_1 = 10; X_2 = 0; X_3 = 20; X_4 = 20 000; X_5 = 0; X_6 = 0.$$

Y el valor de la función objetivo es:

$$\text{Max } Z = 289\ 800.$$

Como puede apreciarse los resultados son números enteros y, en consecuencia, tenemos ya la solución al programa entero.

La compañía de transporte debe adquirir 10 vehículos de tipo A y 20 vehículos de tipo C, con una inversión total de \$ 380 000 quedando un remanente de \$ 20 000.

EJEMPLO No. 12: PROBLEMA DE SECUENCIACION DE VEHICULOS (PROGRAMACION HEURISTICA).

Este tipo de problemas concierne a un conjunto de clientes, todos con dirección y demanda de servicio de un solo producto conocidos. A estos clientes se les sirve desde un solo punto, de donde se despachan una serie de vehículos. El problema consiste en diseñar a costo mínimo rutas de estos vehículos basados en las siguientes restricciones:

- a) Se debe satisfacer la demanda de servicios por unidad de tiempo de cada cliente.
- b) No se puede exceder la capacidad de carga de cada vehículo.
- c) El tiempo total de servicio o bien la distancia total de recorrido, no debe exceder de una cantidad prefijada. Esto suele suceder cuando se tienen res--

tricciones de tipo legal o sindical.

- d) Existe un rango de tiempo en el cual el cliente debe ser atendido.

La formulación matemática del problema es la siguiente. Sea N el número total de clientes a satisfacer, y se les numera del 1 al N . El cliente i , $i = 1, 2, \dots, N$ requiere $q(i)$ unidades (por unidad de tiempo) del único artículo que se distribuye y la distancia entre el cliente " i " y el cliente j , $i \neq j$, $i, j = 1, 2, \dots, N$, es $d(i, j)$ con $d(i, j) = d(j, i)$. Se considera, por claridad de exposición, que el cliente número 1 es el punto de partida de todos los vehículos.

En el punto de partida existe un número no especificado (bastante grande) de vehículos, todos con capacidad de carga de Q unidades. Por cuestiones de tipo sindical un vehículo no puede recorrer en una ruta más de M kilómetros. Una secuenciación específica con " k " rutas, R_1, R_2, \dots, R_k , en que cada una empieza en el punto de partida (localización del cliente 1), sirve a un número de clientes y regresa al punto de partida. El objetivo es determinar el mínimo número de rutas que satisfagan todas las restricciones, tal que el costo total de recorrido (o kilometraje total de recorrido) sea mínimo.

Si la ruta R_i , $i = 1, 2, \dots, k$ tiene n_i clientes que se denotan por $r_i(1), r_i(2), \dots, r_i(n_i)$, entonces el recorrido total para la ruta R_i será:

$$D_i = d(1, r_i(1)) + \sum_{j=2}^{n_i} d(r_i(j-1), r_i(j)) + d(r_i(n_i), 1),$$

y el recorrido total para las "k" rutas será de:

$$\sum_{i=1}^k D_i.$$

Las variables del problema son:

- los clientes $r_i(j)$ en una ruta,
- el número n_i de clientes en la ruta R_i , y
- el número "k" de diferentes rutas.

Se quiere minimizar el número "k" y el número $\sum_{i=1}^k D_i$, tal que se respeten las disposiciones sindicales

$$D_i \leq M; \quad i = 1, \dots, k,$$

y la capacidad de carga

$$\sum_{j=1}^{n_i} q(r_i(j)) \leq Q; \quad i = 1, \dots, k.$$

Se supone que

$$Q \geq q(i); \quad i = 1, \dots, k.$$

Para resolver este problema, se define un "criterio de-

ahorro $s(i, j)$ " dado por:

$$s(i, j) = d(i, j) + d(i, i) - d(i, j) = d(i, j)$$

En palabras, este criterio de ahorro mide el kilometraje ahorrado si una ruta que originalmente acaba en el punto "i", ahora también incluye al punto "j".

El algoritmo de resolución se desarrolla de la siguiente forma:

- Paso 1. Calcule el ahorro $s(i, j)$, para todas las parejas de clientes $i, j = 1, 2, \dots, N; i \neq j$.
- Paso 2. Ordene todos los ahorros $s(i, j)$ en orden descendente de magnitud.
- Paso 3. Empezando con el primero de la lista se hace lo siguiente:

- 3-1. Si al unirse dos clientes por un tramo de la ruta, ésta resulta factible y respeta a todas las restricciones del problema, entonces se agrega este tramo a la solución. Si no, se rechaza. Para una ruta factible se eliminan todos los tramos no analizados que conectan con ese tramo.
- 3-2. Se toma la siguiente pareja de la lista del paso 2, y se repite el paso 3-1. Se continúa con este paso 3-2 hasta terminar de analizar todos los elementos de la lista del paso 2.

Paso 4. Se unen todos los tramos en orden $(1, j)$, (j, k) , \dots , (k, p) , \dots , $(m, 1)$, a fin de formar todas las posibles rutas.

Este algoritmo no produce por regla general una solución óptima, pero sí una solución factible que está en torno del óptimo. Sin embargo debido a su simplicidad y rapidez la solución factible que genera este algoritmo, se puede considerar para fines prácticos como aceptable.

Supóngase a 8 clientes numerados del 2 al 9, y un depósito de vehículos, señalado con el número 1, tal como aparecen en la figura 4.16.

Además se muestra la tabla de distancia entre el depósito y los clientes (tabla 4.8).

El límite máximo de cada ruta no puede exceder los 45 kilómetros. No hay límite de capacidad de carga. Utilizando la conocida fórmula de que si el cliente "i" tiene coordenadas (X_i, Y_i) , y el cliente "j", $j \neq i$, tiene coordenadas (X_j, Y_j) , la distancia $d(i, j)$ se calcula por:

$$d(i, j) = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2},$$

se tiene que:

$$d(2, 3) = 18 \text{ kilómetros}$$

$$d(2, 5) = 21 \text{ kilómetros}$$

$$d(2, 7) = 25 \text{ kilómetros}$$

$$d(2, 4) = 31 \text{ kilómetros}$$

$$d(2, 6) = 15 \text{ kilómetros}$$

$$d(2, 8) = 21 \text{ kilómetros}$$

Etapa 4. Se ordenan los tramos en orden (1, 2), (3, 4), (5, 6), (7, 8), (9, 10) a fin de formar tramos las post-
 -las rutas.

Tabla 4.8

Este algoritmo no produce una ruta general una sola vez, pero en una relación factible que está en forma
 de árbol.

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distancia al depósito	13	7	18	10	7	17	17	15	

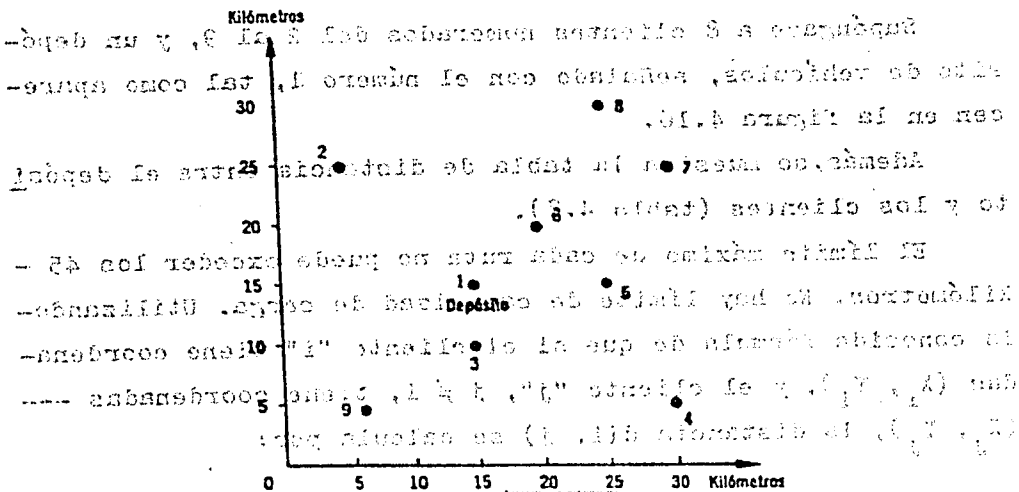


Figura 4.16

a) Se selecciona el tramo (1, 7), (7, 8), (8, 1) con $17 + 8 + 17 = 42$ kilómetros, menor a los 45 kilómetros y por lo tanto es factible.

b) Se selecciona después el tramo (4, 5), (que genera la ruta (1, 4), (4, 5), (5, 1)) con $18 + 11 + 10 = 39$ kilómetros, menor a los 45 kilómetros y por lo tanto es factible.

c) Si se selecciona el siguiente tramo (4, 7), la ruta (1, 7), (7, 4), (4, 5), (5, 1) daría un total de $17 + 18 + 11 + 10 = 56$ kilómetros, que exceden al permisible de 45 kilómetros. Se rechaza por lo tanto al tramo (4, 7).

d) Por razones similares se rechaza al tramo (5, 7).

e) El tramo (6, 7), genera una ruta (1, 8), (8, 7), (7, 6), (6, 1) con $17 + 8 + 9 + 7 = 41$ kilómetros, que es menor a los 45 kilómetros fijados como límite. Por lo tanto esta ruta es factible.

Todos los tramos que conectan con el cliente 7 se eliminan del análisis.

f) Se elimina el tramo (6, 8), porque tiende a generar un circuito cerrado, el (1, 6), (6, 8), (8, 7), (7, 6), (6, 8).

g) Se rechaza al tramo (5, 8) por generar una ruta no factible.

h) El tramo (3, 9) se selecciona para generar la ruta (1, 3), (3, 9), (9, 1) con $7 + 10 + 15 = 32$ kilómetros y por lo tanto es factible.

i) Todos los demás tramos deben rechazarse por gene-

rar rutas no factibles (exceden de los 45 kilómetros).

i) El punto 2 no ha sido conectado aún, por lo que el tramo (1, 2) y el (2, 1) deben constituir una ruta con 26 kilómetros.

En resumen las cuatro rutas seleccionadas son:

Ruta 1: 1 - 6 - 7 - 8 - 1 con 41 kilómetros.

Ruta 2: 1 - 5 - 4 - 1 con 39 kilómetros.

Ruta 3: 1 - 3 - 9 - 1 con 32 kilómetros.

Ruta 4: 1 - 2 - 1 con 26 kilómetros.

El kilometraje total es de 138 kilómetros. Este resultado puede considerarse como uno cercano al óptimo, y por lo tanto aceptable. Si se toman en cuenta restricciones de capacidad, el algoritmo anterior sufre unas ligeras modificaciones, pero aún se le puede utilizar.

EJEMPLO No. 13: DETERMINACION DEL TAMAÑO DE UNA FLOTA DE VEHICULOS (PROGRAMACION HEURISTICA).

Este tipo de problemas puede tener dos presentaciones. En la primera, se supone que todos los vehículos tienen la misma capacidad. El tamaño óptimo de la flota de vehículos se calcula minimizando los costos totales (que incluyen costos fijos y variables). La capacidad de los vehículos se toma como un parámetro, al cual una vez dado un valor determi-

nado, se obtiene un tamaño de flota y un costo óptimo asociado. Después se analizan todos los costos resultantes del proceso de parametrización y se escoge el mínimo de ellos. Esto indica de inmediato el tamaño de flota, costo y capacidad de cada vehículo. Este resultado puede después ajustarse en función del producto que se va a distribuir (si es perecedero o no, si es líquido, gaseoso o sólido, etc.), accesibilidad de vías de comunicación, etc. En la segunda presentación de este problema, se relaja la restricción de que todos los vehículos deben tener la misma capacidad de carga.

Para formular el modelo que resuelve a este tipo de problemas se hacen las siguientes suposiciones:

- a) La localización y demanda por ciclo (conjunto de periodos de tiempo), de cada cliente, es conocida y permanece constante, es decir, no cambia en cada ciclo.
- b) Cada vehículo tiene asociado un costo fijo "k" por periodo. El costo fijo ya incluye los costos de depreciación, salario de choferes, licencias, seguro y otros costos que no dependen del uso del vehículo. La flota consta de N vehículos propios, donde N es una variable de decisión.
- c) Existe un costo variable V que es función del kilometraje recorrido. Este costo absorbe gasolina, lubricantes, mantenimiento, llantas, etc.
- d) Si por algún motivo, la compañía de vehículos necesita alquilar vehículos ajenos, estos acarrean un costo fijo k' y un costo variable V' , donde $k' > k$ y $V' > V$.

El objetivo del problema es determinar el tamaño de N tal que los costos totales se minimicen.

Para estructurar la función objetivo se supone que durante el periodo "i", los vehículos propios de la compañía recorren d_i kilómetros, y que durante ese periodo fue necesario alquilar N_i vehículos ajenos que recorren una distancia total de d'_i . El costo total para la compañía durante el periodo "i" es:

$$C_i = kN + Vd_i + k'N_i + V'd'_i.$$

Si el horizonte de planeación tiene "p" periodos, el costo total para la compañía es:

$$C = \sum_{i=1}^p C_i = kpN + V \sum_{i=1}^p d_i + k' \sum_{i=1}^p N_i + V' \sum_{i=1}^p d'_i.$$

Las incógnitas en la formulación anterior son N , N_i , d_i , d'_i y se requiere encontrarles valores tales que minimicen el costo total C .

El método que se describe a continuación no genera soluciones óptimas, sino soluciones factibles que se encuentran en el entorno de la solución óptima.

Se considera que durante el periodo "i", se requiere un total de S_i vehículos, con los cuales se cubre un recorrido total de por lo menos D_i kilómetros, con objeto de satisfacer la demanda de los clientes durante ese periodo.

Como este método no genera, por lo general, soluciones óptimas sino factibles en el entorno al óptimo, se define en la continuación una cota superior e inferior de la solución óptima. Sean:

S_{11} el número mínimo de vehículos en el periodo "i" con los que se puede satisfacer la demanda de clientes durante ese periodo. A este número corresponde un recorrido de D_{11} kilómetros. S_{11} constituye una cota inferior de S_i . Esta cota inferior depende de que la suposición $k' > k$ y $V' > V$ sea válida.

S_{12} el número de vehículos en el periodo "i" (se calcula como resultado de un análisis de sensibilidad paramétrica sobre las S_{11}) que generan un recorrido total mínimo denotado D_{12} . S_{12} constituye una cota superior de S_i . Esta cota superior es independiente de los parámetros de los costos.

Obviamente se tiene:

$$S_{12} \geq S_i \geq S_{11}$$

$$D_{12} \leq D_i \leq D_{11}$$

El resultado que genera el método para el periodo "i" es precisamente S_i (con su D_i correspondiente). Obviamente no son deseables valores menores a S_{11} , puesto que ocasionan recorridos totales mayores a D_{11} . Por otro lado, no se re---

quieren recorridos totales menores a S_{12} porque generarían tamaños de flotas mayores a S_{12} .

Para calcular los valores de S_{11} se utilizan los métodos tipo "mochila" (que pretenden colocar de manera óptima una cierta cantidad de uno o varios productos dentro de uno o varios vehículos de cierta capacidad, en forma semejante a como un excursionista acomoda su equipo en una mochila), y para el cálculo de S_{12} los métodos explicados en el ejemplo anterior.

Existen tres situaciones que se deben analizar:

$$a) N < S_{11}'$$

$$b) S_{11}' < N < S_{12}'$$

$$c) S_{12}' < N$$

En el primer caso, la flota propia de la compañía no es suficiente para abastecer a todos los clientes. ¿Entonces, cuántos vehículos deben alquilarse? La respuesta es un número que oscila entre una cota inferior de $S_{11} - N$ vehículos y una superior de $S_{12} - N$ vehículos. Paramétricamente utilizando una combinación de los problemas tipo "mochila" y el método para la secuenciación de vehículos, se encuentra la respuesta deseada.

En el segundo caso, se tiene un número suficiente de vehículos propios para satisfacer la demanda de los clientes. Sin embargo, eso no quiere decir que se tiene un costo de operación óptimo, pues se sabe que si se alquilan vehículos ajenos, los recorridos totales tienden a disminuir y por ende

los costos asociados. Sin embargo, por otro lado, se incrementan los costos asociados al alquiler de vehículos. El costo en el entorno al costo óptimo deberá calcularse por un análisis paramétrico, utilizando una combinación del método "mochila" y el de la secuenciación de vehículos, variando el valor de N en la forma:

$$S_{11}, S_{11} + 1, S_{11} + 2, \dots, S_{12}$$

En el tercer caso se tiene un número suficiente de vehículos propios para satisfacer la demanda de clientes, y si en efecto $k' > k$ y $V' > V$, no es necesario analizar el efecto de alquilar vehículos ajenos.

Una vez que se tenga un valor de N para el periodo "i", se puede calcular C_i . Hecho esto para todos los "p" periodos se tiene un valor de C . Si este valor de C se encuentra en forma paramétrica para valores de $N = S_{12}$, y después para valores de $N = S_{12} - 1$, y después $N = S_{12} - 2$, etc., hasta llegar a valores de $N = S_{11}$, se escoge aquel valor de N que genera el mínimo costo total C . Si por algún motivo, la condición $V' > V$ y $k' > k$ no se cumple, el análisis paramétrico debe continuarse hasta el valor $N = 0$, inclusive.

En la tabla 4.9 se presenta la localización de 30 clientes (en un sistema coordinado de 100 kilómetros), con su demanda diaria, por cada día hábil (5) de una semana. Cada día constituye un periodo y cinco periodos consecutivos, constituyen un ciclo.

El número de clientes con demanda diferente a cero unidades es de 30 y la demanda total es de 683 unidades de 50 kilos.

Cliente	Localización		Demanda por período (en unidades de 50 kilos)					Demanda total por ciclo (en unidades de 50 kilos)
	X	Y	1	2	3	4	5	
1	60	29	27	0	20	0	20	67
2	55	3	50	0	50	60	50	210
3	5	75	65	0	0	65	65	195
4	12	5	0	20	25	0	22	67
5	66	9	22	0	0	26	17	65
6	18	57	0	15	18	0	15	48
7	44	77	33	0	20	0	28	81
8	99	24	10	0	0	10	10	30
9	53	55	0	20	41	0	37	98
10	61	63	15	0	15	0	15	45
11	32	61	0	10	18	0	12	40
12	55	95	0	25	32	0	35	92
13	75	27	47	0	26	0	37	110
14	49	4	12	0	0	27	14	53
15	8	38	59	0	0	13	65	137
16	45	11	65	0	0	50	65	180
17	71	89	5	0	0	0	10	23
18	28	96	17	0	0	19	15	51
19	76	77	0	20	45	0	50	115
20	25	40	30	0	0	28	25	83
21	53	42	26	0	0	31	30	87
22	78	64	43	0	29	0	33	105
23	77	52	0	23	35	0	28	86
24	39	44	0	26	40	0	34	100
25	5	67	50	0	25	0	50	125
26	92	8	70	0	0	40	60	170
27	22	34	12	0	0	9	5	26
28	93	38	0	15	22	0	12	49
29	42	19	10	0	0	10	10	30
30	94	80	15	10	15	10	10	60
Total demandado (en unidades de 50 kilos)			683	184	484	398	879	
Número de clientes con demanda diferente a cero unidades			21	10	18	14	30	

Tabla 4.9

El único artículo en cuestión se distribuye en unidades de 50 kilos cada uno y la capacidad de cada vehículo es de 5 toneladas. Se supone que cada vehículo no debe recorrer más de 200 kilómetros diarios.

Se analiza el modelo que resuelve el problema del tamaño de la flota de vehículos, que satisfacen la demanda por ciclo de los 30 clientes, para un conjunto de costos diferentes. Estos juegos de costos son:

Problema	k (en pesos)	V (en pesos/km)	k'	V'
I	10	.05	10	.10
II	10	.05	20	.10
III	10	.05	10	.40
IV	10	.05	15	.40
V	10	.05	15	.50

Tabla 4.10

Nótese que para todos los juegos de costos anteriores se cumple la condición $k \leq k'$ y $V < V'$.

Para cada periodo "i", $i = 1, 2, 3, 4, 5$, por medio de un algoritmo tipo "mochila", se optimiza una serie de problemas del tipo:

$$\text{Máx} \sum_{j=1}^{30} X_{ji}$$

sujeto a

$$\sum_{j=1}^{30} w_{ji} x_{ji} \leq 5\,000,$$

$$x_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{si el cliente "j" se incluye en el periodo "i"} \\ 0, & \text{si el cliente "j" se rechaza en el periodo "i"} \end{cases}$$

donde w_{ji} es el peso de la demanda del cliente "j" durante el periodo "i". Sólo se consideran aquellos clientes x_{ji} en el periodo "i", cuyo $w_{ij} > 0$. Se requerirán resolver tantos problemas tipo "mochila" (con la ayuda de un método de bifurcación y acotación), hasta que todos los clientes en un mismo periodo $w_{ji} > 0$ hayan sido servidos. Así se obtienen los resultados de la tabla 4.11.

De los resultados obtenidos, se sacan las siguientes cotas inferiores de N:

$$\begin{aligned} S_{11} &= 7 \text{ vehículos} \\ S_{21} &= 2 \text{ vehículos} \\ S_{31} &= 5 \text{ vehículos} \\ S_{41} &= 5 \text{ vehículos} \\ S_{51} &= 9 \text{ vehículos.} \end{aligned}$$

Para obtener las cotas superiores S_{i2} , $i = 1, \dots, 5$ de N, se hace la siguiente pregunta: ¿Cómo resolvería el algoritmo de secuenciación de vehículos la secuenciación de rutas para todos los clientes que se encuentran en el periodo i , $i = 1, 2, \dots, 5$, como consecuencia del cálculo de las cotas inferiores S_{i1} , respetando las restricciones de una capacidad de 5 toneladas por vehículo y de no más de 200 kilóme-

0000 >= 10^k 10^k / 10^k

"I" obokreg is no ovvibnt ee "I" otuvilo is la ,f

"I" obokreg is no

Periodo	Número de vehículos	Clientes (con carga W ₁₁ > 0)	Carga		Recorrido total (kilómetros) D ₁₁
			en unidades de 50 kilos	en kilos	
1	1	10, 21, 15	100	5,000	1,331
	2	5, 14, 16	99	4,950	
	3	27, 29, 2	99	4,950	
	4	22, 13	90	4,500	
	5	17, 30, 8, 26	100	5,000	
	6	25, 18, 7	100	5,000	
	7	3, 20	95	4,750	
2	1	12, 19, 30, 28, 23	93	4,650	1,331
	2	24, 4, 6, 11, 9	91	4,550	
3	1	7, 17, 30, 10, 9	99	4,950	1,331
	2	19, 28, 13	93	4,650	
	3	11, 6, 24, 1	96	4,800	
	4	2, 4, 5	100	5,000	
	5	12, 22, 23	96	4,800	
4	1	2, 14, 29	97	4,850	573
	2	3, 18	84	4,200	
	3	21	31	1,550	
	4	30, 8, 26, 3	86	4,300	
	5	20, 15, 27, 16	100	5,000	
5	1	26, 8, 28, 10	97	4,850	1,146
	2	18, 3, 16	95	4,750	
	3	21, 16	95	4,750	
	4	9, 25, 11	99	4,950	
	5	2, 29, 27, 24	99	4,950	
	6	22, 23, 13	98	4,900	
	7	7, 17, 30, 19	98	4,900	
	8	20, 4, 14, 5, 1	98	4,900	
	9	15, 12	100	5,000	

Tabla 4.11

tros de recorrido total por vehículo? La aplicación de este algoritmo daría el número de rutas necesarias con las que se minimiza el recorrido total, más no necesariamente el costo. Los resultados que se obtienen se muestran en la tabla 4.12.

Por lo tanto las cotas superiores son:

$$\begin{aligned} S_{12} &= 8 \text{ vehículos} \\ S_{22} &= 2 \text{ vehículos} \\ S_{32} &= 6 \text{ vehículos} \\ S_{42} &= 5 \text{ vehículos} \\ S_{52} &= 10 \text{ vehículos,} \end{aligned}$$

o sea que

$$\begin{aligned} S_{11} = 7 &\leq N \leq S_{12} = 8 \text{ para el periodo 1.} \\ S_{21} = 2 &\leq N \leq S_{22} = 2 \text{ para el periodo 2.} \\ S_{31} = 5 &\leq N \leq S_{32} = 6 \text{ para el periodo 3.} \\ S_{41} = 5 &\leq N \leq S_{42} = 5 \text{ para el periodo 4.} \\ S_{51} = 9 &\leq N \leq S_{52} = 10 \text{ para el periodo 5.} \end{aligned}$$

Se tiene para el periodo 2, que el número de vehículos debe ser igual a dos y de cinco en el periodo 4. La tabla 4.13 resume el kilometraje total de recorrido por periodo y por ruta si se utilizan S_{11} vehículos (con un - en la tabla) y si se utilizan S_{12} vehículos (con un + en la tabla).

El valor óptimo de N se encuentra analizando los costos C en el siguiente rango:

-este es el resultado de la aplicación de este método de transporte de los vehículos en las rutas de este tipo de servicio en las zonas de servicio.

Ruta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
1	25, 10, 7	12, 19, 30 28, 23	4, 2, 1	2, 14, 29	21, 5, 8 26, 23
2	13, 1, 21	24, 4, 6 11, 9	19, 30, 17, 12	3, 18	9
3	5, 2, 14, 27		13, 28, 23	21	25, 6, 24
4	22, 30, 17, 10		24	30, 8, 26, 5	30, 17, 12, 18, 7
5	3		10, 22, 9	20, 15, 27, 16	2, 14, 4 27
6	29, 16		7, 25, 6, 11		13, 26
7	15, 20				10, 19, 22
8	26, 8				3, 11
9					1, 16, 29
10					20, 15
Recorrido total en km: D ₁₂	858	331	600	573	1046

Tabla 4.12

Recorrido total en kilómetros por ruta por periodo utilizando S₁₁ o S₁₂ vehículos.

Ruta \ Periodo		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-	127	108	127	101	200	136	117			
	+	136	70	133	121	102	79	86	131		
2	-	180	151								
	+	180	151								
3	-	133	133	107	200	122					
	+	150	141	102	24	65	118				
4	-	102	132	16	196	127					
	+	102	132	16	196	127					
5	-	148	135	79	102	125	181	135	160	161	
	+	142	10	100	172	149	117	81	102	86	86

Tabla 4.13

Si $2 \leq N \leq 10$, se obtiene el resultado de la siguiente manera:

Como $V' > V$ y $k' > k$, se hace a continuación un análisis paramétrico de la variación del costo C (en cada problema I, II, ..., V) para valores de $N = 2, 3, \dots, 10$. De todos los valores de C calculados (para un problema fijo), se escoge el menor y eso determina la N óptima para el problema en cuestión. Los resultados ya resumidos para este ejemplo son:

Problema	N óptima (en número de vehículos)	C óptima (en pesos)	Estructura por periodo
I	5	505	-, -, -, -, -
II	6	559	-, -, +, -, -
III	7	594	-, -, +, -, -
IV	8	602	+, -, +, -, -
V	9	610	+, -, +, -, -

Tabla 4.14

Esta tabla tiene la siguiente interpretación: asociado a un problema (I, II, III, IV o V), el - significa que para ese periodo "i" la ruta viene de la tabla para S_{11} , y el + significa que la ruta viene de la tabla para S_{12} .

Así por ejemplo, para el problema IV ($k = \$10$, $k' = \$15$, $V = \$0.05/\text{kilómetro}$, $V' = \$0.40/\text{kilómetro}$), se tiene una flota óptima de 8 vehículos propios, con un costo total mínimo-

de § 602 que opera de la siguiente manera.

Para el primer periodo el resultado proviene de $S_{12}(+)$, es decir:

	Vehículos	Ciudades
	4	22, 30, 17, 10
	5	3
	6	29, 16
	7	15, 20
	8	26, 28

	III
	II
	I

Para el segundo periodo el resultado proviene de $S_{21}(-)$ o $S_{22}(+)$, puesto que son iguales, es decir:

Vehículos	Ciudades
1	12, 19, 30, 28, 23
2	24, 4, 6, 11, 9

Tabla 4.16

Para el tercer periodo el resultado proviene de $S_{32}(+)$, es decir:

Vehículos	Clientes
1	4, 2, 1
2	19, 30, 17, 12
3	13, 28, 23
4	24
5	10, 22, 9
6	7, 25, 6, 11

Tabla 4.17

Para el cuarto período el resultado proviene de $S_{41}(-)$ o $S_{42}(+)$ que son iguales, es decir:

Vehículos	Clientes
1	2, 14, 29
2	3, 18
3	21
4	30, 8, 26, 5
5	20, 15, 27, 16

Tabla 4.18

Para el quinto y último período el resultado proviene de $S_{51}(-)$, es decir:

Vehículos	Cientes
1	26, 8, 28, 10
2	18, 3, 6
3	21, 16
4	9, 25, 11
5	2, 29, 27, 24
6	22, 23, 13
7	7, 17, 30, 19
8	20, 4, 14, 5, 1
(rentado) 9	15, 12

Tabla 4.19

Nótese que solamente en el último periodo del ciclo para el problema IV, es necesario alquilar un vehículo ajeno. También debe notarse, cómo los resultados son sensibles al cambio de costos (k, k', V, V').

¿Cómo se resolvería este problema si se relaja la condición de que la capacidad de carga de todos los vehículos debe ser la misma?

En este segundo caso se hacen las siguientes suposiciones:

- a) Se conoce la demanda de cada uno de los clientes para cada periodo y se le considera constante en un ciclo, es decir, no cambia en un ciclo. Se denota a la demanda total de un periodo por $w_i, i = 1, 2, \dots, p$, esto es:

$$W_i = \sum_{j=1}^{n_i} W_{ji}$$

donde W_{ji} es la demanda del cliente j , $j = 1, \dots, n_i$ en el periodo i , $i = 1, \dots, p$. Existen n_i clientes en el periodo "i".

- b) Existen "m" clases diferentes de vehículos, cada clase k , $k = 1, \dots, m$ con capacidad máxima de carga de Q_k kilos.- Si se escogen X_{ki} vehículos de la clase k , $k = 1, \dots, m$, en el periodo i , $i = 1, \dots, p$, la capacidad total de carga T de toda la flota de vehículos es:

$$T_i = \sum_{k=1}^m X_{ki} Q_k$$

- c) El costo por vehículo por periodo, es función del tipo de vehículo. Este costo debe calcularse empíricamente de las observaciones de campo; es decir, de la operación real. Un costo empírico podría ser, por ejemplo, el siguiente:
- $$e_k = a_k + b_k \sqrt{Q_k}; \quad k = 1, 2, \dots, m$$

donde a_k , b_k son constantes asociadas con el tipo "k" de vehículo, Q_k es la capacidad máxima de carga de dicho tipo de vehículo y e_k es el costo por periodo para esa clase de vehículo. Este tipo de costo, es cóncavo, queriendo decir que a medida que se aumenta la capacidad de carga, el costo marginal decrece; aunque el costo total va en aumento (ver figura 4.17).

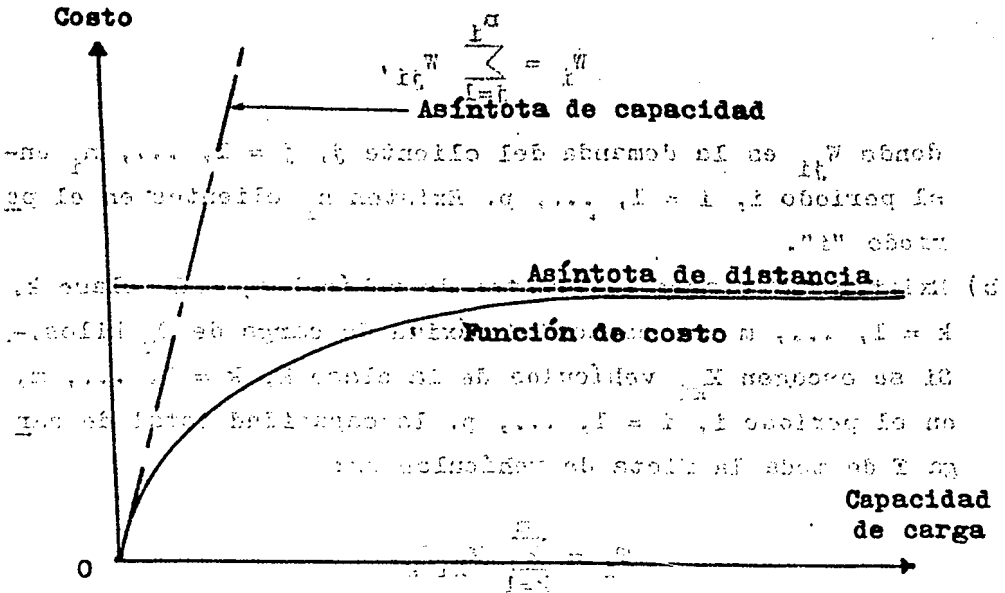


Figura 4.17

d). Existen m tipos diferentes de vehículos para alquilar, - cada uno con una capacidad Q'_k , $k=1, \dots, m$ y costo e'_k empírico. Si se alquilan X'_{ki} vehículos del tipo k , $k=1, \dots, m$ en el período "i", la capacidad total de carga para ese período es:

$$T'_i = \sum_{k=1}^m X'_{ki} Q'_k$$

e) Se supone, de observaciones empíricas del trabajo real, - que un vehículo propio de la clase "k" puede surtir a h'_k clientes, mientras que un vehículo alquilado de la clase "k", puede surtir a h''_k clientes.

El problema se reduce entonces a encontrar el valor de las variables enteras X_{ki} y X'_{ji} , $k = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, m'$; $i = 1, \dots, p$, tal que minimicen la siguiente función de costo:

$$C = \sum_{i=1}^p W_i \left(\sum_{j=1}^m e_j X_{ji} \right) + \sum_{j=1}^{m'} e'_j X'_{ji},$$

sujeta a las siguientes restricciones:

- a) restricción de capacidad: que dice, que la capacidad total propia más la alquilada debe ser mayor o igual a la demanda total, es decir

$$T_i + T'_i \geq W_i; \quad i = 1, \dots, p,$$

- b) restricción de clientela: que dice, que el número total de clientes que se puede surtir con la flota propia más la alquilada, debe ser mayor o igual al número de clientes (n_i) a servir en el periodo i , $i = 1, \dots, p$, es decir

$$\sum_{j=1}^m h_j X_{ji} + \sum_{j=1}^{m'} h'_j X'_{ji} \geq n_i; \quad i = 1, \dots, p,$$

- c) restricciones de no divisibilidad: que quiere decir que los resultados deben ser enteros, es decir

$$X_{ji}, X'_{ki} \geq 0, \text{ enteros } j = 1, \dots, m; k = 1, \dots, m'; \\ i = 1, \dots, p.$$

Este problema entero puede resolverse por métodos propios de programación entera (sección 4.3.4.1.7); por ejemplo, métodos de planos de corte, bifurcación y acotación, y enumeración implícita.

EJEMPLO No. 14: REEMPLAZO (INMINENCIA DE FALLA).

Supóngase que la turbina de un avión DC-10 tiene una función de densidad de probabilidad de falla como la que se muestra en la figura 4.18. Supóngase que el avión se reemplaza cuando la probabilidad de falla es mayor que 0.10.

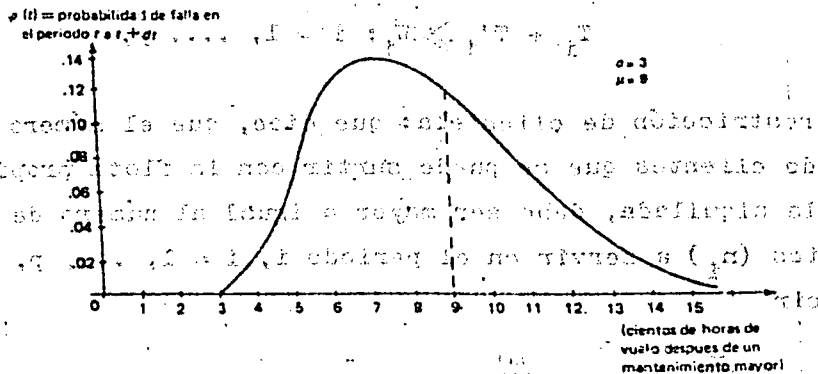


Figura 4.18. Función de densidad de probabilidad de falla de una turbina.

La distribución $\phi(t)$ aparenta ser gama, con media de 900 horas de vuelo y desviación estándar de 300 horas.

Para los cálculos que siguen no se utiliza (por simpli-

idad) la distribución teórica; en su lugar se emplea la distribución empírica observada (figura 4.13).

El costo de mantenimiento de esta turbina es de \$1 300 000 si se efectúa en la base del avión y \$2 300 000 en otro aeropuerto (el segundo costo aumenta por los gastos asociados al envío de piezas y personal entrenado a la base foránea).

Se desea encontrar el periodo óptimo T' para dar mantenimiento preventivo a la turbina del DC-10, de manera que se minimicen costos y disminuya la probabilidad de falla. Supongamos que no se utiliza el criterio de valor presente.

El modelo de análisis se puede construir bajo el supuesto de que se conoce la probabilidad de falla del recurso, — así como los costos (asociados al mantenimiento o reemplazo). Sea $\phi(t)$ la densidad de probabilidad de que una falla ocurra en el intervalo t a $t + dt$ y se supone que no existe mantenimiento preventivo (los recursos se reemplazan cuando y donde fallen). El valor esperado de la vida útil de un recurso, antes de que falle, es:

$$\mu = \int_0^{\infty} \phi(t) dt$$

y el costo unitario esperado de mantenimiento es:

$$C = \frac{A}{\mu}$$

donde A es el costo de reparación después de la falla.

Si existe un mantenimiento preventivo cada T unidades de tiempo, la vida útil esperada para aquellos recursos que fallan es:

$$\mu = \int_0^T t \psi(t) dt$$

mientras que para los que no fallan en ese lapso de tiempo será sencillamente T . La vida útil \bar{t} en un sistema con mantenimiento preventivo está dada por:

$$\bar{t} = \int_0^T t \psi(t) dt + T \int_T^{\infty} \psi(t) dt$$

W = costo unitario de reparación antes de la falla

Z = costo unitario de reparación después de la falla

el valor esperado del mantenimiento unitario en un periodo dado es:

$$C = \left[W \int_0^T \psi(t) dt + Z \int_T^{\infty} \psi(t) dt \right] \frac{1}{\bar{t}}$$

que puede también expresarse como

$$C = \frac{(w - z) \int_0^T \varphi(t) dt + z}{\int_0^T t \varphi(t) dt + T \int_T^{\infty} \varphi(t) dt}$$

El periodo óptimo para proporcionar mantenimiento preventivo T se obtiene de resolver $dc/dT = 0$, que origina, después de cierto manipuleo algebraico y de cálculo integral la siguiente expresión:

$$\frac{\int_T^{\infty} \varphi(t) dt}{\int_0^T \varphi(t) dt} = \frac{\int_0^T t \varphi(t) dt + T \varphi(T) - \int_0^T \varphi(t) dt}{w - z}$$

Una manera de resolver esta expresión es darle diferentes valores a T hasta aproximar el lado izquierdo de la ecuación al valor $z/(w - z)$. Esta expresión no toma en cuenta el valor presente (descontado) de los costos.

En la tabla 4.20 se resumen los cálculos de una ecuación equivalente a esta última expresión para valores de $T = 0, 100, 200, \dots, 1200$ horas de vuelo.

Como se están realizando cálculos para valores discretos de T , no continuos, la ecuación utilizada es:

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
Mantenimiento preventivo cada t periodos (en cientos de horas de vuelo)	Probabilidad acumulada de falla $p = \int_0^T \psi(t) dt$	Probabilidad de falla en el periodo T $P_t = \int_0^T \psi(t) dt - \int_0^{T-t} \psi(t) dt$	$q = 1 - \int_0^T \psi(t) dt$	$q \times ⑤$	Acumulación de ⑥ $\sum P_t$	$\frac{⑦}{⑧}$ $\frac{q}{P}$	$\frac{⑦ \times ⑧}{⑨}$ $\frac{q \times P}{S - T}$	Parte izquierda de la ecuación 10.12 $⑧ + ⑨$ $q + (S - T)$
1	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0002	0.0002	0.9998	0.0004	0.0004	0.0002	0.0000	0.0002
3	0.0038	0.0036	0.9962	0.0108	0.0112	0.0036	0.0000	0.0070
4	0.0213	0.0125	0.9787	0.0700	0.0812	0.0172	0.0415	0.0502
5	0.0630	0.0467	0.9320	0.2335	0.3147	0.0501	0.0150	0.4371
6	0.1526	0.0846	0.8474	0.5076	0.8223	0.0998	0.0421	0.8251
7	0.2709	0.1183	0.7291	0.8281	1.6504	0.1623	0.2479	1.3162
8	0.4074	0.1370	0.5926	1.0920	2.7424	0.2303	0.6516	1.8840
9	0.5444	0.1370	0.4356	1.2330	3.9754	0.3037	1.1934	2.4775
10	0.6671	0.1227	0.3329	1.2270	5.2024	0.3686	1.0176	3.0871
11	0.7680	0.1009	0.2320	1.1099	6.3123	0.4349	2.7452	3.0871
12	0.8450	0.0780	0.1550	0.9280	7.2363	0.4968	3.9950	3.6740

Tabla 4.20

$$f_b(t) = \frac{f(t) \cdot q}{P}$$

--979 ctnslnmnoq
 280 amrtjto amp
 91 lrtjvctni oljv
 --979 ctnslnmnoq
 280 amrtjto amp
 91 lrtjvctni oljv

--979 ctnslnmnoq
 280 amrtjto amp
 91 lrtjvctni oljv
 --979 ctnslnmnoq
 280 amrtjto amp
 91 lrtjvctni oljv

$$\frac{p_t}{q} \sum_{t=1}^T tp_t + \frac{T}{T} p_t = \bar{p} = \frac{Z}{W - Z}$$

$$= \frac{1\,300\,000}{(2\,300\,000 - 1\,300\,000)} = 1.3$$

donde p , q y p_t se explican en la tabla 4.20. El valor óptimo T es cercano a 800 horas de vuelo (ver tabla 4.21), momento en que se deberá dar mantenimiento preventivo total a la turbina.

TABLA 4.21

T	$\bar{t} = \sum_{t=1}^T tp_t + Tq$	$1,300,000 + 1,000,000p$	C
1	1.00	1,300,000	1,300,000
2	2.00	1,300,000	650,000
3	3.00	1,304,000	435,000
4	4.00	1,321,000	330,000
5	4.97	1,368,000	275,000
6	5.91	1,453,000	246,000
7	6.75	1,571,000	235,000
8	7.48	1,707,000	228,210
9	8.08	1,844,000	228,220
10	8.53	1,967,000	231,000
11	8.86	2,068,000	233,000
12	9.10	2,145,000	236,000

Tabla 4.21

Su promedio de vida útil será:

EJEMPLO No. 15: LINEAS DE ESPERA (UNA COLA - UN SERVIDOR - POBLACION INFINITA).

$$P_0 = e^{-\lambda} = e^{-5} = 0.0067$$

Petróleos Mexicanos estudia la utilización de la gasolinera que se encuentra en el kilómetro 70 de la carretera estatal Toluca - Valle de Bravo, en el Estado de México. La gasolinera tiene 6 bombas, 4 para gasolina nova, 1 para gasolina extra y otra para diesel.

Las llegadas de autobuses que cargan diesel muestran una distribución que se aproxima a la de Poisson, mientras que el servicio muestra una distribución exponencial.

El promedio de llegadas a la bomba diesel es de 5 autobuses por hora, mientras que los servicios promedios en esa bomba son de 7 por hora.

Sólo se puede dar servicio en esa bomba a un autobús a la vez, y se sirve a los autobuses en el orden en que llegan a la bomba.

Encuentre los parámetros que describen cuantitativamente a esta bomba diesel, para que posteriormente se pueda tomar una decisión, acerca de la instalación de otras bombas diesel en ese lugar.

Se tiene $\lambda = 5$, $\mu = 7$, por lo que $\rho = 5/7 < 1$, y se aplican las fórmulas dadas en la sección 1.3.1.2.4.

La probabilidad de encontrar la bomba diesel vacía es:

$$P_0(t) = 1 - \frac{\lambda}{\mu} = 1 - \frac{5}{7} = 0.29$$

mientras que la probabilidad de encontrar un autobús cargan-

... otros (esperando) en las alcantarillas (obstruidas) ...
(POPULATION INFINITA)

$$P_3(t) = (\lambda/\mu)^3 P_0(t) = (5/7)^3 \cdot 0.29 = 0.11.$$

El número esperado de autobuses que hacen cola es:

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{5^2}{7(7 - 5)} = \frac{25}{14} = 1.79 \text{ autobuses}$$

mientras que el número esperado de autobuses en el sistema (en la bomba y haciendo cola) es:

$$L_s = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = \frac{5}{7 - 5} = \frac{5}{2} = 2.5 \text{ autobuses.}$$

El tiempo promedio de espera en la cola es:

$$T_s = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{5}{7(7 - 5)} = \frac{5}{14} = 0.36 \text{ de hora}$$

o sea, casi 22 minutos, mientras que el tiempo promedio para salir del sistema (cargar diesel y abandonar la gasolinera) es:

$$T_w = T_s + \frac{1}{\mu} = 0.36 + \frac{1}{7} = 0.50 \text{ de hora}$$

o sea, 30 minutos. La probabilidad de que en el sistema se encuentren más de tres autobuses es:

$$P(W > 3) = \rho^4 = (5/7)^4 = 0.26.$$

La probabilidad de que la espera en la cola sea mayor a 0.75 de hora (45 minutos) es:

$$P(T_p > 0.75) = 0(5/7)e^{-7(1 - 5/7)0.75} = 0.16$$

mientras que la probabilidad de que un autobús espere en el sistema 1 hora o más antes de abandonarlo (ya cargado con diesel) es:

$$P(T_w > 1) = e^{-7(1 - 5/7)1} = 0.14$$

Cada autobús de la línea "El Saltito del Mota, S.A." ha ce 6 recorridos diarios Valle del Bravo-Toluca-Valle de Bravo. El recorrido es tal que obliga a los autobuses a rellenar sus tanques de diesel cada tercer viaje redondo. El tiempo promedio de espera en el sistema para cargar diesel por auto bús es de 30 minutos. El costo de operación mensual de un au tobús (sueldos del operador, gasolina, aceite, mantenimiento, refacciones, seguros, depreciación, otros) es de 50 mil pe--
sos y opera 22 días por mes, 18 horas por día. Por lo tanto, el costo diario (cada 24 horas), por esperar a cargar diesel por autobús es:

$$\frac{2 \text{ cargas}}{\text{día}} \times \frac{1/2 \text{ hora de espera}}{\text{carga}} \times \frac{50 \text{ mil pesos}}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{22 \text{ días}} \times \frac{1 \text{ día}}{18 \text{ horas}} = 126.26 \text{ pesos/día (costo por esperar).}$$

Los empresarios de todas las líneas de autobuses con se

de en Valle de Bravo, que hacen el recorrido Valle de Bravo-Toluca-Valle de Bravo (supongamos que son 60 en total), han solicitado a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes un aumento al costo del pasaje en un 30%, (ya que la espera en la única bomba diesel disponible en su recorrido, los hace ser menos productivos de los que podrían ser (realizar uno o dos viajes más por día)).

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes les ha negado el aumento debido a que no quiere acelerar el proceso inflacionario, pero ha aceptado presionar a las autoridades de Petróleos Mexicanos, para que instalen más bombas diesel en dicha gasolinera.

¿Cuántas bombas diesel debería instalar Petróleos Mexicanos a fin de abatir los costos de espera de los autobuses y mitigar las demandas de aumentos de precios de pasajes? Si se instala una bomba más para cargar diesel, el problema se convierte en uno de tipo una cola servidores múltiples en paralelo población infinita. En este caso tenemos $s = 2$, $\lambda/s\mu = 5/2(7) = 5/14$ y $5/14 < 1$. Y los resultados para este tipo de problema son presentados a continuación.

La probabilidad de encontrar vacías las dos bombas de diesel es:

$$P_0(t) = \left[\sum_{m=0}^{s-1} \frac{1}{m!} (\lambda/\mu)^m + \frac{1}{s!} (\lambda/\mu)^s \frac{s}{(s\mu - \lambda)} \right]^{-1}$$

$$P_0(t) = \left[\frac{1}{0!} (5/7)^0 + \frac{1}{1!} (5/7)^1 + \frac{1}{2!} (5/7)^2 \frac{5^2}{(2(7) - 5)^2} \right]^{-1}$$

El largo de la cola es:

El largo de la cola es:

$$L = \frac{\lambda \mu (\lambda/\mu)^s P_0(t)}{(s-1)!(s\mu - \lambda)^2}$$

$$= \frac{5(7)(5/7)^2}{(2-1)!(2(7) - 5)^2} (0.47) = 0.10$$

El número de autobuses en el sistema es:

$$W = L + \lambda/\mu$$

$$W = 0.10 + 5/7 = 0.81$$

El tiempo promedio de espera en la cola es:

$$T_s = L/\lambda = 0.10/5 = 0.02$$

o sea, 0.02 de hora = 1.4 minutos, mientras que el tiempo dentro del sistema (cargar diesel y abandonar la gasolinera) es:

$$T_w = T_s + 1/\mu = 0.02 + 1/7 = 0.16 \text{ de hora,}$$

$$\left[\frac{(r) \frac{r}{s}}{(2 - (r)s)} + \frac{r}{s} + \frac{(r) \frac{r}{s}}{(2 - (r)s)} + \frac{r}{s} + \frac{(r) \frac{r}{s}}{(2 - (r)s)} + \frac{r}{s} \right] = (+) 0^T$$

o sea, 9.6 minutos o 9 minutos y 36 segundos.

Ahora el costo de operación diario por esperar a cargar diesel por autobús es:

$$\frac{2 \text{ cargas}}{\text{día}} \times \frac{0.16 \text{ horas de espera}}{\text{carga}} \times \frac{50 \text{ mil pesos}}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{22 \text{ días}} \times \frac{1 \text{ día}}{18 \text{ horas}} = 40.40 \text{ pesos/día (costo por esperar).}$$

Por lo tanto, si se instala una bomba de diesel adicional en la gasolinera, entonces los costos de operación se abaten en un 32% haciendo innecesario el aumento a los precios del pasaje.

Es importante hacer notar que no aceptó que los autobuses forman una sola cola y pasan a cargar diesel a la bomba que se desocupa; de otra manera, los resultados obtenidos no son válidos.

EJEMPLO No. 16 LINEAS DE ESPERA (COMPORTAMIENTO PRIORITARIO DE UNA LINEA DE ESPERA).

En algunos sistemas existen prioridades entre los servicios que se proporcionan a los usuarios que los solicitan.

Existen algunos resultados teóricos, derivados del análisis matemático con distribución de Poisson y servicio distribuido exponencialmente, donde los clientes son atendidos según la clase de prioridad que tengan.

Sean:

unos servidores como

s : número de servidores. $\frac{1}{\mu} = \frac{1}{s\mu} = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{\mu}$

μ : promedio de servicio, considerado constante para cada servidor. $(i = 1, 2, \dots, s)$

k : tipo de prioridad existente entre "n" clases de la misma, es decir, $k = 1, 2, \dots, n$.

λ_k : promedio de llegada de clientes en la clase de prioridad "k", $k = 1, 2, \dots, n$.

Se tiene:

$$\lambda = \sum_{k=1}^n \lambda_k \quad \text{y} \quad \rho = \frac{\lambda}{s\mu}$$

El tiempo de estadía en el sistema, para un cliente de la clase "k", $k = 1, 2, \dots, n$, es:

$$T_{wk} = \frac{1}{A(B_{k-1})(B_k)} + \frac{1}{\mu}, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

donde

$$A = s! \left(\frac{s\mu - \lambda}{\rho^s} \right) \sum_{j=0}^{s-1} \frac{\rho^j}{j!} + s\mu$$

$$B_0 = 1 \quad \text{y} \quad B_k = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{s\mu}, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

En lo anterior se supone que $\sum_{i=1}^k \lambda_i < s\mu$.

Otros resultados son:

$$T_{sk} = T_{wk} - \frac{1}{\mu}, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

$$W_k = \lambda_k (T_{wk}), \quad k = 1, 2, \dots, n$$

Los resultados anteriores son válidos para el llamado - "sistema sin aborto de servicio": un sistema donde no se suspende el servicio a un cliente por la llegada de otro, con mayor prioridad. En estos sistemas, un cliente con prioridad mayor al resto de los que esperan, se coloca adelante de la cola, pero debe esperar a que un servidor se desocupe para - que él entre a servicio.

Existen resultados para el "sistema con aborto de servicio", donde se suspende el servicio de un cliente para atender a otro con prioridad mayor. Para un servidor, se tiene - el siguiente resultado:

$$T_{wk} = \frac{1/\mu}{(B_{k-1})B_k}, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

donde B_k y B_{k-1} se calculan de las expresiones dadas anteriormente.

Ahora supóngase que un aeropuerto considera 4 tipos de prioridades para autorizar un aterrizaje:

- a) Prioridad cero o baja, aterrizaje normal.
- b) Prioridad uno o media, aterrizaje cuando algún ins--

trumento o aparato no crítico del avión muestra una falla.

c) Prioridad dos o alta, aterrizaje cuando algún instrumento o aparato crítico del avión muestra una falla.

d) Prioridad tres o crítica, aterrizaje cuando el avión tiene un incendio o el combustible se ha agotado.

Observando el funcionamiento anual del aeropuerto, se encontró que el 80% de los casos son de prioridad cero, el 15% de prioridad uno, el 4.997% de prioridad dos y sólo el 0.003% es de prioridad tres. La llegada de aviones al aeropuerto es una variable aleatoria con distribución de Poisson. El aeropuerto recibe un vuelo normal cada 18 minutos, en promedio; un vuelo de prioridad media cada hora, 36 minutos en promedio; un vuelo de prioridad dos cada 4 horas 48 minutos 10 segundos en promedio y un vuelo de prioridad crítica cada 333 días 7 horas 55 minutos 12 segundos, en promedio.

El servicio que presta la torre de control para que aterricen los aviones es una variable aleatoria con distribución negativa exponencial y valor medio de $2 \frac{1}{2}$ minutos por avión. En la torre de control se tiene un grupo de controladores por pista de aterrizaje que está en servicio.

Describiremos cuantitativamente el comportamiento de la línea de espera para una pista de aterrizaje con política abortativa y para una y dos pistas de aterrizaje bajo una política no abortativa.

En primer lugar se tiene:

	Política abortativa	Política no abortativa	
A	3317.76	3317.76	83076.71
B ₀	1	1	1
B ₁	0.8611	0.8611	0.9305
B ₂	0.8351	0.8351	0.9175
B ₃	0.8264	0.8264	0.9132
B ₄	0.8264	0.8264	0.9132
T _{w1}	2 min 54 seg	3 min	2 min 31 seg
T _{w2}	3 min 58 seg	3 min 06 seg	2 min 31 seg
T _{w3}	3 min 37 seg	3 min 07 seg	2 min 31 seg
T _{w4}	3 min 39 seg	3 min 08 seg	2 min 31 seg
T _{s1}	24 seg	30 seg	01 seg
T _{s2}	58 seg	36 seg	01 seg
T _{s3}	1 min 07 seg	37 seg	01 seg
T _{s4}	1 min 09 seg	38 seg	01 seg
W ₁	0.16 aviones	0.17 aviones	0.14 aviones
W ₂	0.04 aviones	0.03 aviones	0.03 aviones
W ₃	0.01 aviones	0.01 aviones	0.01 aviones
W ₄	0.00 aviones	0.00 aviones	0.00 aviones

Tabla 4.22

... $\mu = \frac{1 \text{ avión}}{2.5 \text{ min}} = 576 \text{ aviones/día}$ como resultado de los

... $\lambda_1 = \frac{1 \text{ avión}}{18 \text{ min}} = 80 \text{ aviones/día}$ de los servicios de

... $\lambda_2 = \frac{1 \text{ avión}}{1 \text{ hr } 36 \text{ min}} = 15 \text{ aviones/día}$ de los servicios de

... $\lambda_3 = \frac{1 \text{ avión}}{4 \text{ hrs } 48 \text{ min } 10 \text{ seg}} = 4.9971 \text{ aviones/día}$ de los

... $\lambda_4 = \frac{1 \text{ avión}}{333 \text{ días } 7 \text{ hrs } 55 \text{ min } 12 \text{ seg}} = 0.003 \text{ aviones/día}$

... Por lo tanto: el sistema de los servicios de los

... $\lambda = \sum_{i=1}^4 \lambda_i = 80 + 15 + 4.9971 + 0.003 = 100.0001 \text{ aviones/día}$

... Además: $\rho = \lambda/\mu = 100.0001/576 = 0.17 < 1$ como se

... Utilizando las fórmulas anteriores se obtienen los re-

... resultados de la tabla 4.22 en el sistema de los servicios de los

... EJEMPLO No. 17: SISTEMAS DE GRAN ESCALA. Los servicios de los

... servicios de los servicios de los servicios de los servicios de los

... ¿En qué sentido se puede clasificar un sistema de trans-

... porte regional como un sistema de gran escala? ¿Cuáles son -

... las principales "interconexiones" de ese sistema con otros -

... sistemas de infraestructura en una región? ¿Cuál sería el --

... costo de planear por separado los diferentes sistemas de in-

... fraestructura?

- a) En todos sentidos se puede clasificar un sistema de transporte regional como un sistema de gran escala. Existe una estructura sociológica, económica y política muy complicada entrelazada con este procedimiento: cuya importancia y comportamiento deben incluirse en el análisis.
- b) Es claro que un sistema de transporte regional puede tener interconexiones (interdependencias) con la industria minera (si se requiere transporte de minerales), eléctrica (si el sistema de transporte incluye vehículos eléctricos como: trenes, etc.) y con otros sistemas.
- c) Esta pregunta es la más importante de este problema, y toca un tema que se podría incluir dentro del aspecto "arte" de la Ingeniería de Sistemas, pues no existe ninguna regla sistemática general para determinar estos costos. Se puede notar, sin embargo, que esto es de suma importancia pues es parte integral de la pregunta más general que se diría: "¿Cuál es el costo de no utilizar un enfoque de sistemas multi-industrial en la planificación industrial de una región?" Un procedimiento que se pudiera seguir sería el de analizar por pares, las industrias de infraestructura en la región; es decir, calcular sus costos individuales, y los costos incurridos si se planearan en conjunto. La diferencia de estos valores podría ser una indicación del tipo de pérdidas causadas por no utilizar un enfoque de sistemas multi-industrial.

EJEMPLO No. 18: SIMULACION.

Unos autobuses están programados para que pasen por --- cierta esquina cada 15 minutos, pero en realidad la llegada de uno de ellos varía normalmente alrededor del tiempo programado de llegada, con una desviación estándar de 3 minutos. La gente que desea abordar el autobús llega según una distribución exponencial, con tasa media de llegada de 4 por hora (1 cada 15 minutos), y el número de asientos vacíos en el autobús sigue una distribución de Poisson con tasa media de $3/2$. Si no se permiten viajeros de pie, encuentre el tiempo-medio de espera de una persona que llega a esperar el autobús.

El periodo investigado se toma aproximadamente como de 8 horas. Las columnas en la tabla 4.23 (I a VI) están marcadas en el orden en el cual se obtienen. Las columnas I y II se refieren a los tiempos de llegada de los autobuses y a los lugares disponibles que éstos tienen, y se obtuvieron mediante Monte Carlo a partir de las distribuciones dadas. La columna III se refiere al intervalo entre la llegada de una persona y la siguiente a la parada del autobús y se obtuvo mediante Monte Carlo de la distribución exponencial $e^{-(1/15)T}$. Todos los datos están en minutos, medidos a partir del tiempo inicial del procedimiento de muestreo simulado.

Una vez que se obtienen los tiempos de llegada de la gente y de los autobuses, la asignación de la gente a los autobuses se hace automática. El principio obvio es que una --

I Autobuses, número de asientos vacíos, Monte Carlo	II Autobuses, tiempo de llegada, Monte Carlo	V Asigna- ción de llegadas de auto- buses	IV Personas, tiempo de llegada, a partir de III	III Personas, tiempo entre llegadas, Monte Carlo	VI Personas, tiempo de espera, a partir de II, IV, V
3	17	/	8	8	9
2	28	/	13	5	4
1	46	/	18	4	10
1	58	/	22	5	6
1	75	/	49	27	0
2	90	/	58	0	17
2	111	/	71	13	25
0	122	/	91	20	5
1	130	/	133	42	23
0	148	/	130	6	17
2	156	/	154	15	31
3	185	/	189	35	3
3	192	/	207	18	2
1	209	/	216	9	10
2	226	/	223	7	3
1	241	/	247	24	5
3	252	/	341	04	7
2	267	/	350	0	9
4	286	/	352	2	20
2	304	/	369	17	3
2	313	/	401	32	3
0	332	/	402	1	—
3	348	/	403	1	—
1	359	/	416	13	—
3	372	/	425	9	—
1	388	/			
1	404	/			

Tabla 4.23

... persona se asigna a un autobús si ésta se halla esperando --
 cuando llega el autobús y encuentra un asiento disponible. --

Una vez que se asigna una persona a un autobús, su tiempo de espera (columna VI), se obtiene restando su tiempo de llegada del tiempo de llegada de su autobús. Los tiempos de espera de 21 llegadas se obtuvieron totalizando 221 minutos. Así, nuestra estimación del tiempo medio de espera de una llegada

... 10.5 minutos. Naturalmente, para que esta estimación sea válida se requiere efectuar un mayor número de procesos de simulación, tantos como sea necesario, hasta lograr que la media de las estimaciones obtenidas en cada simulación tienda a ser constante. Por lo tanto, el resultado obtenido en este ejemplo es sólo un indicador del tiempo medio de espera para una etapa de una simulación que fuera más completa y no el resultado final.

EJEMPLO No. 19: ANALISIS DE DECISIONES.

Este ejemplo trata de la aplicación del análisis de decisiones con objetivos múltiples a la selección de la alternativa más viable para la localización del nuevo aeropuerto de la Ciudad de México.

En este proyecto participaron funcionarios de la entonces Secretaría de Obras Públicas y un grupo de consultores procedentes del Massachusetts Institute of Technology; del International Institute for Applied Systems Analysis en Laxenburg, Austria; y de Harvard University. El proyecto se desarrolló en 1971 y el detalle del mismo puede consultarse en:

- a) De Neufville R. y Marks D. H. "Systems Planning and Design. Case Studies in Modeling, Optimization and Evaluation". Prentice-Hall, 1974.

b) Keeney R. L., "A Decision Analysis with Multiple Objective.

The Mexico City Airport", Bell Journal of Economics and Management Science, Vol. 4, pp. 101-117, 1973.

c) Keeney R. L. y Raiffa H., "Decision with Multiple Objectives. Preference and Value Tradeoffs", John Wiley & Sons, 1976.

Las autoridades gubernamentales de México se plantearon las siguientes dos preguntas a principios de la administración del presidente Luis Echeverría (1970-1976):

P_1 . ¿Cómo debería desarrollarse la capacidad aeroportuaria de la Ciudad de México para atender el servicio aéreo hasta el año 2000?

P_2 . Una vez resuelta la pregunta anterior, ¿qué actividades deberían instrumentarse inmediatamente, a plazo medio y a largo plazo?

En 1971, el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México proporcionó servicio a cerca de dos millones de pasajeros, alcanzando con esa cifra casi un nivel de saturación. Se exploraron en principio tres posibles alternativas:

- a) Expandir la capacidad del actual aeropuerto.
- b) Construir uno nuevo en la región de Zumpango, 43 km al norte del actual.
- c) Una combinación de ambas alternativas.

Cada alternativa tenía sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, la alternativa a) tenía la ventaja del acceso de -- los usuarios, pero su construcción resultaba costosa por encontrarse en los bordes del Lago de Texcoco (figura 4.19) -- con suelos que aún actualmente se hunden a diferentes niveles y velocidades; las ventajas de a) se convertían en desventajas de b), pero los costos de construcción en Zumpango resultaban considerablemente más baratos, dado que se trataba de un suelo mucho más uniforme y firme.

Institucionalmente, intervinieron en las discusiones -- las Secretarías de Obras Públicas (SOP), de Comunicaciones y Transportes (SCT) y de la Presidencia. Cada uno de estos actores, justificaba alternativas diferentes: SOP por el nuevo aeropuerto en Zumpango y SCT por la ampliación del ya existente.

El primer paso metodológico consistió en criticar los -- estudios que justificaban las posturas de SOP y SCT, y construir modelos de análisis de decisiones con objetivos múltiples para apoyar respuestas a las preguntas hechas anteriormente.

Para resolver la pregunta P_1 se construyó un modelo estático de análisis de decisiones con objetivos múltiples y -- para la pregunta P_2 , un modelo dinámico. A continuación se analizan, sucintamente y en forma separada.

El modelo estático llegó a considerar hasta 4 096 diferentes alternativas teóricas caracterizadas por el tipo de -- servicio (doméstico, internacional, general y militar), el -- año inicial de cambios (1975, 1985, 1995) y políticas opera-

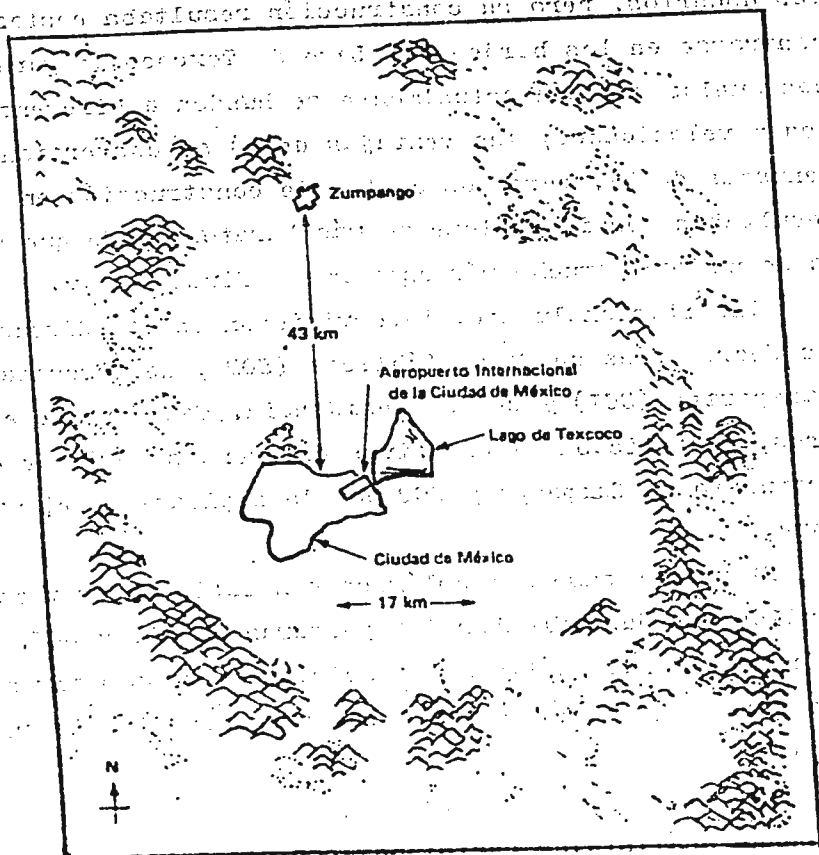


Figura 4.19

tivas (actual aeropuerto sirve doméstico, internacional, general y militar; Zumpango sirve doméstico, internacional; general y militar; combinación de las anteriores donde existe sirve general y militar, mientras que Zumpango sirve doméstico e internacional). Análisis más refinados eliminaron cerca de 3.900 alternativas, para considerar cerca de 100 alternativas prácticas.

El grupo final de participantes quedó constituido por:

- a) Funcionarios de la Secretaría de Obras Públicas (SOP).
- b) Funcionarios de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA).
- c) Representantes de líneas aéreas internacionales y nacionales.
- d) Muestras de pasajeros.
- e) Representantes de las posibles compañías constructoras.
- f) Público diverso.

Después de consultas intensivas entre los participantes se llegaron a definir los siguientes seis atributos asociados a los objetivos generales:

1. Minimizar costos totales de construcción y mantenimiento.
2. Aumentar la capacidad para satisfacer la demanda.
3. Minimizar tiempo de acceso de los usuarios al aeropuerto.
4. Maximizar la seguridad del sistema.
5. Minimizar los efectos sociales negativos derivados de la construcción de un nuevo aeropuerto.
6. Minimizar la contaminación por ruido.

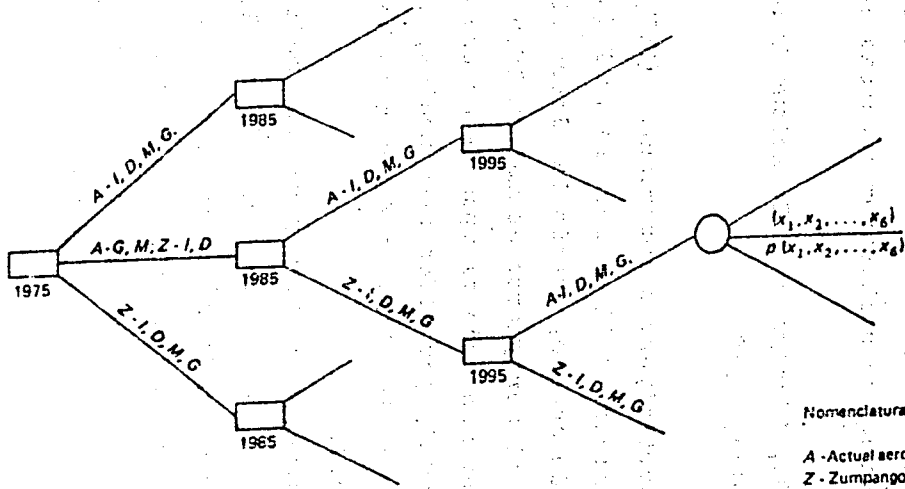
- Las medidas de efectividad de estos objetivos fueron —
 en respectivamente: X_1 : costo total en millones de pesos, X_2 : número de servicios (aterrizajes y despegues) por hora, X_3 : minutos promedio de recorrido del usuario de su origen en la Ciudad de México al aeropuerto, X_4 : número esperado de heridos o muertos por avión accidental, X_5 : número de personas desalojadas por expansión o construcción del aeropuerto, y X_6 : número de gente sujeta a un ruido de 90 decibeles o más.

Dados los tipos de servicios (4), los tres periodos iniciales para tomar una decisión (1975, 1985, 1995), y las tres políticas operativas ya mencionadas, se pudo construir un árbol de decisión para el modelo estático, como el que aparece en la figura 4.20.

Este modelo estático sirvió únicamente para criticar — más objetivamente cualquier postura pasada respecto del problema (estudios anteriores) así como sentar las bases para un análisis posterior, mediante modelos dinámicos.

A continuación se estimó el posible impacto de cada una de las alternativas a_j del conjunto de posibles alternativas factibles. Esto se hizo estimando la distribución conjunta de probabilidad de a_1 sobre las seis medidas de efectividad, es decir, $P_j(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6)$.

Se hicieron varias suposiciones acerca de P_j . La más im



- Nomenclatura:
- A - Actual aeropuerto
 - Z - Zumpango
 - J - Internacional
 - D - Doméstico
 - G - General
 - M - Militar
 - (X_1, X_2, \dots, X_6) consecuencia
 - $p(X_1, X_2, \dots, X_6)$ distribución conjunta de consecuencias
 - : decisión
 - : ocurrencia de un estado de la naturaleza

Figura 4.20

portante fue la de independencia probabilística mutua, es decir:

$$P_j(X_1, X_2, \dots, X_6) = P_j(X_1)P_j(X_2) \dots P_j(X_6)$$

donde $P_j(X_k)$, $k = 1, \dots, 6$, es la densidad marginal de X_k - condicionada por a_j . Para la construcción de las $P_j(X_k)$, $k = 1, \dots, 6$ y toda a_j , se utilizaron técnicas descritas en:

Schlaifer R. O., "Analysis of Decisions Under Uncertainty", Mc Graw-Hill, 1969,

sobre muestras de participantes importantes (SOP, ASA, etc.). Por ejemplo, en la figura 4.21 se muestra la $P_k(X_3)$, correspondiente a tiempo de acceso, cuando la alternativa a_k es -- "expansión total en el aeropuerto actual en 1975". Esta curva se construyó experimentando tiempos de acceso de diferentes puntos de la ciudad, por diferentes medios, en diferentes días (con lluvia y sin ella), a diferentes horas (horas-pico, madrugada, etc.).

Se generaron curvas similares para cada medida de eficiencia, X_i , $i = 1, \dots, 6$, y para cada alternativa a_j .

A continuación se consideró el impacto de cada alternativa y la preferencia relativa del grupo decisor sobre esos impactos. En otras palabras, se tuvo que construir la función de utilidad con atributos múltiples

$$\mu(X) = f \left[\mu_1(X_1), \mu_2(X_2), \dots, \mu_6(X_6) \right]$$

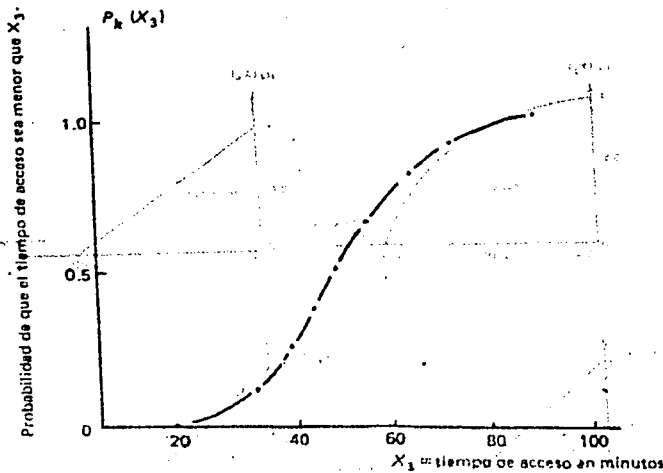


Figura 4.21

donde $\mu_i(X_i)$ es la función de utilidad unidimensional del atributo X_i , $i = 1, \dots, 6$. Se supuso que los atributos eran independientes en utilidad, por lo que se procedió a generar funciones unidimensionales de distribución marginal, $\mu_i(X_i)$, $i = 1, \dots, 6$.

El método seguido, explicado en las referencias de Keeney y Schlaifer, pero que posiblemente utilizó técnicas Delfos entre el grupo decisor, generó las funciones de utilidad unidimensionales $\mu_i(X_i)$, $i = 1, \dots, 6$, que se muestran en la figura 4.22.

Las preguntas que se utilizaron para generar estas curvas de utilidad fueron del tipo: ¿para qué probabilidad p_i son indiferentes a las situaciones a) y b)?, donde

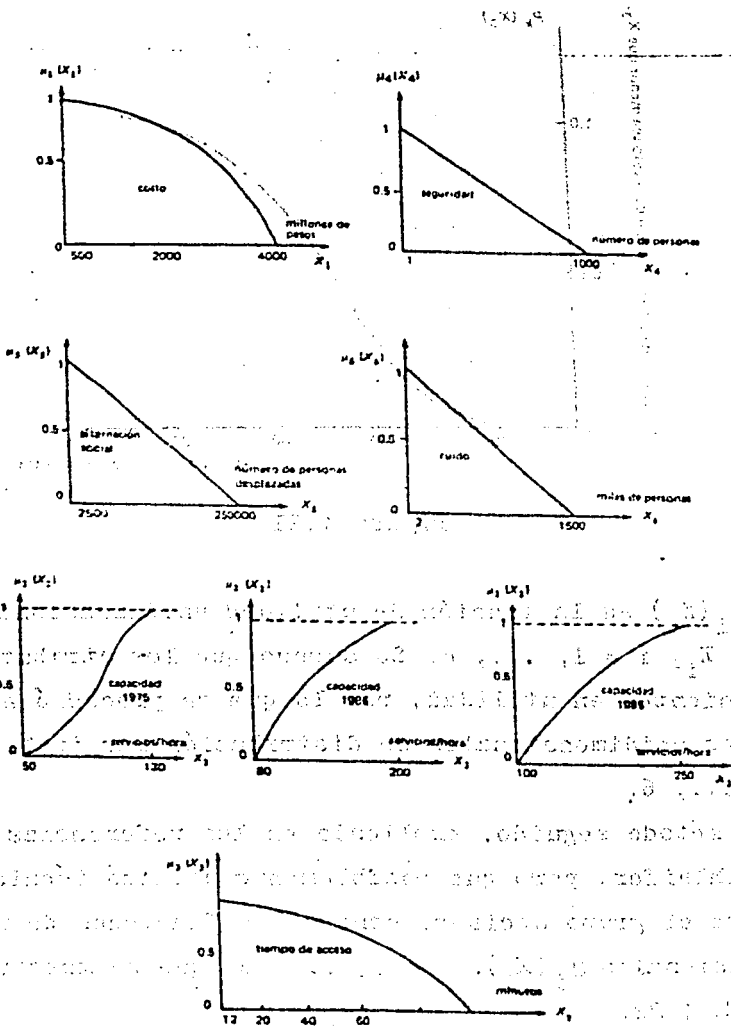


Figura 4.22

- a) Consecuencia segura de obtener X_1 al nivel de preferencia más alta y el resto de las X_j , $j = 1, \dots, 6, j \neq 1$, al nivel de preferencia más bajo.
- b) Consecuencia de obtener todos los atributos a nivel de preferencia máxima con probabilidad p_1 , o al nivel de preferencia mínima con probabilidad $1 - p_1$.

Por ejemplo, si el atributo en cuestión fue X_3 (tiempo de acceso al aeropuerto medido en minutos) se encontró que $\mu_3(12) = 1$ y $\mu_3(90) = 0$, es decir, el nivel de preferencia máxima fue de 12 minutos y el nivel de preferencia mínima, 90 minutos. Con esta información se encontró por ejemplo, que para el grupo decisor 62 minutos era indiferentes a una lotería (denotada por $[12, 90]$), cada evento con probabilidad de ocurrencia $1/2$. En otras palabras

$$\begin{aligned}\mu_3(62) &= \frac{1}{2} \mu_3(12) + \frac{1}{2} \mu_3(90) \\ &= \frac{1}{2}(1) + \frac{1}{2}(0) = \frac{1}{2}\end{aligned}$$

En forma similar se encontraron el resto de los puntos de la función de utilidad $\mu_3(X_3)$ y la forma de las otras funciones de utilidad (ver figura 4.22).

La forma exacta de la función de utilidad multidimensional fue:

$$\mu(x_1, \dots, x_6) = \sum_{i=1}^6 k_i \mu_i(x_i) + k \sum_{i=1}^6 \sum_{j>1}^6 k_i k_j \mu_i(x_i) \mu_j(x_j) +$$

$$+ k^5 k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 \mu_1(x_1) \mu_2(x_2) \mu_3(x_3) \mu_4(x_4) \mu_5(x_5) \mu_6(x_6).$$

En la expresión anterior, $\mu_i(x_i)$ es una función de utilidad unidimensional del atributo x_i , $i = 1, \dots, 6$, normalizado entre 0 y 1; k_i es un factor de escalamiento para μ_i y "k" es otra constante de escalamiento. Cada k_i toma valores entre 0 y 1. Cuando la suma de todas las k_i es igual a uno, entonces $k = 0$ y la expresión anterior se convierte en:

$$\mu(x_1, \dots, x_6) = \sum_{i=1}^6 k_i \mu_i(x_i).$$

Cuando la suma de todas las k_i no es igual a uno, entonces $k \neq 0$ y la expresión anterior toma la siguiente forma:

$$\mu(x_1, \dots, x_6) = \frac{1}{k} \prod_{i=1}^6 [k k_i \mu_i(x_i) + 1] - \frac{1}{k}.$$

Cada factor k_i puede interpretarse como la utilidad asignada por el grupo a una consecuencia con todos los atributos al nivel de preferencia más alto excepto el x_i que se encuentra al nivel de preferencia más bajo. Los valores de estos parámetros fueron los que se muestran en la tabla 4.24.

El valor del parámetro "k" se obtuvo de:

$$k = (k k_1 + 1)(k k_2 + 1) \dots (k k_6 + 1) - 1$$

Atributos X_i	Factor de escalamiento k_i
X_1 = costo	0.48
X_2 = capacidad	0.60
X_3 = tiempo de acceso	0.10
X_4 = seguridad	0.35
X_5 = desplazamiento	0.18
X_6 = ruido	0.18

Tabla 4.24

generando un valor de $k = -0.877$.

Se diseñó un programa de computadora el cual dado cualquier conjunto de distribuciones de probabilidad y funciones de utilidad, obtenía el valor esperado de la utilidad para varias alternativas.

Los resultados del modelo estático fueron dos de carácter general:

- a) Desarrollar gradualmente el aeropuerto de Zumpango sobre un horizonte de planeación de 30 años.
- b) Movilizar todos los servicios aeroportuarios a Zumpango para 1985.

El modelo estático sirvió para identificar los impactos de cada una de las alternativas sobre un conjunto de seis atributos. A continuación se diseñó un modelo dinámico para recomendar la instrumentación de acciones específicas del go

bierno federal a partir de 1971. Este segundo modelo fue menos formal que el modelo estático.

El espacio de alternativas del modelo dinámico, que se ilustra en la figura 4.23, muestra las 16 opciones disponibles para el grupo.

		Sitio actual			
		Mínimo	Bajo	Moderado	Alto
Zumpango	Mínimo	(1) Prácticamente	(2)	(3) Desarrollo del actual aeropuerto	(4)
	Rojo	(5) No cambia el status quo	(6)	(7) Desarrollo principal en el aeropuerto actual, con algo de soporte en Zumpango	(8)
	Moderado	(9) Desarrollo de	(10) Desarrollo principal en el aeropuerto de	(11) Desarrollo de des grandes	(12)
	Alto	(13) Zumpango	(14) Zumpango con algo de soporte en el aeropuerto actual	(15) Aeropuertos: el actual y el de Zumpango	(16)

Espacio de opciones

Figura 4.23

Para la alternativa de expandir el actual aeropuerto se consideraron cuatro opciones de desarrollo:

- Mínimo. Mantenimiento e introducción de equipo de seguridad.
- Bajo. Ampliar pistas, mejorar las terminales, manteni---

- al "reconstruirse" se requiere como prioridad el suministro e introducción de equipo de seguridad.

Moderado. Considera lo mismo que el nivel bajo, pero completamente se expropia más terreno.

Alta. Se construye un nuevo aeropuerto en el mismo sitio del actual.

Para la alternativa de construir en Zumpango, también se consideraron cuatro niveles de desarrollo:

Mínimo. Expropiar terrenos.

Bajo. Construir una sola pista y una terminal modesta.

Moderado. Construir un aeropuerto de tamaño medio que pudiera expandirse modularmente.

Alta. Construir un aeropuerto internacional en dicha zona.

Se fijaron cuatro grandes objetivos para el modelo dinámico: efectividad, consecuencias políticas, consecuencias externas y flexibilidad.

Por efectividad se consideraron los seis atributos mencionados en el modelo estático. Las consecuencias políticas estaban asociadas a efectos en varios organismos del gobierno, especialmente SOP, SCT, Secretaría de la Presidencia y Oficina del Presidente, así como a la trascendencia sexenal (el gobierno del Lic. Luis Echeverría terminó en 1976 y cada presidente se preocupa por el legado histórico de su administración sexenal; de haberse creado un tremendo aeropuerto, sin un uso efectivo, se pudo haber corrido el riesgo de pa-

sar a la historia como creador de "elefantes blancos"). La flexibilidad se refería a la gama de alternativas y a los cambios que se pudieran dar una vez tomado un curso de acción. El resto de las consideraciones que no encajaron en los tres primeros objetivos, formaron el cuarto, titulado "de consecuencias externas". En este último se consideraron atributos tales como: caminos de acceso, distribución del gasto, desconcentración del mismo, desarrollo regional, prestigio nacional, y otros.

El grupo de decisores eliminó 7 de las 16 alternativas (la 1, 7, 8, 11, 12, 15 y 16), por razones que no vienen al caso mencionar, pero que se detallan en las referencias ya citadas. Las alternativas restantes se jerarquizaron por el grupo decisor mediante técnicas apropiadas (Delfos), dando el resultado que se muestra en la tabla 4.25.

De ella se deduce que para el grupo decisor las alternativas dominantes fueron la 2, 5, 6 y 10.

Estas alternativas se definieron de una manera más precisa para repetir el ejercicio de jerarquización entre el grupo decisor. La segunda iteración arrojó la alternativa 6 como la de mayor jerarquización.

Esta alternativa se refiere a: "extender una pista en el aeropuerto actual; expropiar terrenos en Zumpango y construir allí una pista con facilidades aeroportuarias modernas".

Durante el gobierno del presidente Echeverría no se llevó a cabo ninguna construcción en Zumpango, sólo se expropiaron los terrenos y se llevaron a cabo ciertas remodelaciones

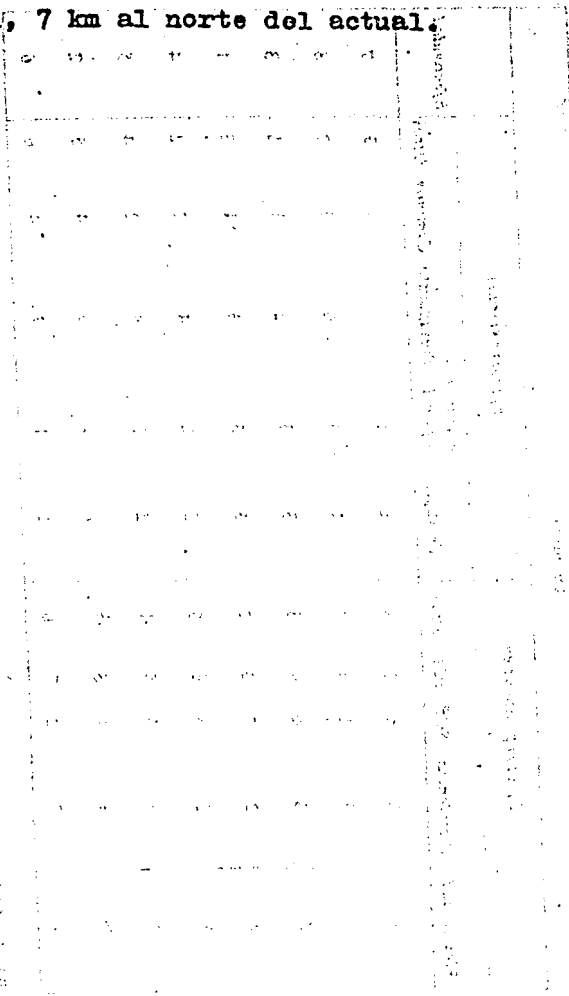
Alternativa	Atributos										Efectividad
	Efectos políticos en					Efectos externos					
	Flexibilidad	Presidencia	SOP	SCT	Otros	Prestigio	Desarrollo regional	Presupuesto	Caminos	Otros	
2*	1	1	8	2	3	4	4	1	1	3	7
3-4	7	4	5	1	4	1	4	6	3	7	8
5*	2	3	6	4	3	3	3	2	1	1	3
6*	3	2	7	3	2	3	3	3	1	3	1
9	4	6	3	6	5	2	2	4	2	2	4
10*	5	5	4	5	1	2	2	5	2	4	5
13	6	8	1	8	7	1	1	6	4	5	2
14	8	7	2	7	6	1	1	7	4	6	6

* Dominante en la jerarquización total de los 4 atributos.

Tabla 4.25

El nivel de (OTCI) alcanzado por las alternativas de desarrollo de las zonas de influencia de las obras de infraestructura de transporte en el territorio nacional.

en el aeropuerto actual. Ocho años después (1979), se iniciaron los estudios para la construcción de un nuevo aeropuerto internacional, 7 km al norte del actual.



5. CONCLUSIONES.

Para que los transportes cumplan con su objetivo en el sector económico terciario del país, es indispensable llevar a cabo una planeación integral y racional de los mismos. Tal planeación, como ha podido constatarse, requiere que se consideren a un mismo tiempo varios aspectos importantes, y siendo ésta la primera etapa en el desarrollo de cualquier sistema, debe realizarse de una manera cuidadosa y satisfactoria. Así, las etapas subsecuentes contarán con una base sólida para llevarse a efecto.

También es interesante hacer notar que el enlazar adecuadamente el nivel de planeación macrorregional al nivel nacional y regional, es de vital importancia.

Además, en los problemas de transporte intervienen muchas variables (algunas de ellas difíciles de cuantificar) - que deben ser consideradas y que complican enormemente la obtención de una buena solución, creando problemas complejos - de gran escala que no pueden resolverse con ayuda de los procedimientos habitualmente utilizados en situaciones simplificadas.

Es en este instante cuando la Ingeniería de Sistemas se nos revela como una metodología adecuada y como un conjunto-

de herramientas útiles y de gran potencial para solucionar este tipo de problemas.

La Ingeniería de Sistemas representa el proceso de implementación del enfoque de sistemas. El principio fundamental de este enfoque establece que los problemas asociados a un determinado sistema no deben ser analizados separadamente, sino de modo conjunto.

En el caso de los sistemas de transporte, el enfoque de sistemas contempla todos los elementos de los sistemas y sub sistemas relacionados con los transportes. Con esta idea la planeación, el diseño, la implementación, el control, el mantenimiento y el retiro de un sistema de esta especie debe tomar en cuenta, en todas y cada una de sus partes, las circunstancias que atañen a los tres elementos básicos de todo sistema de transporte: la vía, el vehículo y el usuario. Se deben tener presentes los costos y los beneficios reales que se derivarán del efecto de seguir un determinado curso de acción, y considerar las repercusiones que se tendrán en los factores ideológicos, políticos, sociales, técnicos, ambientales, humanos y otros.

Hasta la fecha, las soluciones dadas a los problemas de transportes han sido precipitadas y orientadas a resolver temporalmente las situaciones presentes, propiciando que los problemas se agraven y se tornen críticos. Y aun cuando en buena parte de ellos se han aplicado los modelos proporcionados por la Investigación de Operaciones, no puede afirmarse que se haya utilizado la Ingeniería de Sistemas en su más amplio sentido ya que esta última profesa la consideración de-

todos los componentes del sistema y es frecuente encontrar situaciones en las cuales la solución sólo ha considerado a la vía o al vehículo; inclusive es común que la opinión del usuario ni siquiera se tome en cuenta para la planeación de los sistemas, considerándolo únicamente como un elemento pasivo del sistema y no como lo que realmente representa, un elemento activo que debe participar de los beneficios esperados.

La Ingeniería de Sistemas nos brinda la oportunidad de considerar todos los elementos y sus interrelaciones permitiéndonos observar al sistema completo e interconectado dentro de un contexto más amplio que nos proporciona un camino diferente para hallar una solución razonable a los problemas en cuestión. Por esta razón, la Ingeniería de Sistemas debe implementarse en forma más constante y seria en todos los problemas que los transportes nos plantean, pues sus modelos pueden darnos desde un índice simple para tomar una decisión hasta números precisos y únicos para lograr obtener los mejores beneficios de cualquier situación, ya sea que se trate de la eficiencia de algún servicio, de reducir tiempos o costos, o de maximizar ganancias.

Por otro lado, también es importante tener presente que los elementos de los sistemas de transporte evolucionarán con el tiempo haciendo indispensable que las personas encargadas de llevar a cabo la planeación de tales sistemas estén al corriente de los avances tecnológicos y científicos que se vayan suscitando. Los vehículos del futuro serán distintos a los actuales y requerirán, eventualmente, de vías e --

instalaciones diferentes a las disponibles hoy en día, para poder circular. Podemos pensar en monorraíles o en trenes que viajarán suspendidos de estructuras especiales, en barcos de mayores dimensiones que los actualmente existentes, en automóviles que se desplazarán sobre colchones de aire o sobre rieles en las calles que permitirán a estos vehículos transitar en forma independiente o conjuntamente en arreglos de trenes, y en vehículos computadorizados que serán completamente autónomos (las referencias 2 y 7 dan testimonio de algunos proyectos que ya han sido experimentados y que han probado ser factibles). También podemos esperar que los aviones presenten características especiales como el despegue y el aterrizaje vertical y que los aeropuertos reciban otro tipo de vehículos (el 14 de abril de 1981, el transbordador espacial "Columbia" aterrizó por primera vez en una pista de la Base Edwards en California, B. U. A. demostrando que en un futuro próximo las naves espaciales despegarán y aterrizarán en los aeropuertos normales).

Tal vez la tarea más importante consista en prevenir las dificultades que pudieran presentarse por no tomar en cuenta aspectos tan importantes como los ya mencionados; y esto solamente podría realizarse mediante una correcta planeación de los sistemas de transporte. Debe impedirse que ocurra lo que aconteció, por ejemplo, con el advenimiento del automóvil. Este medio de transporte se topó con una red vial urbana diseñada para el tránsito de calesas y otros vehículos de tracción animal, siendo totalmente inadecuada para la circulación eficiente de automóviles y con el paso del tiempo -

surgieron los congestionamientos y todos los problemas viales que actualmente padecen las metrópolis modernas.

Otro factor que no ha recibido la atención necesaria es la planeación del uso de la tierra, pues sólo cuando el desarrollo del suelo sea congruente con el desarrollo de los sistemas de transporte, éstos podrán planearse, diseñarse y operarse de manera más eficiente.

Por último, debemos estar conscientes de que nunca podremos estar seguros que un determinado conjunto de planes dará resultados satisfactorios, necesitamos algo adicionalmente: establecer pasos explícitos que puedan tomarse en caso de que los planes fracasen. Este es probablemente uno de los aspectos más descuidados en el enfoque de sistemas referente a diseño y planeación. Quienes planean, generalmente están demasiado optimistas acerca del éxito, de tal manera que al ocurrir un fracaso, no están preparados para tomar las medidas necesarias, debido a que nunca tomaron en cuenta esta posibilidad con anterioridad.

... BIBLIOGRAFIA ...

1. Ackoff, R. L. y Sasieni, M. W. "Fundamentals of Operations Research". John Wiley & Sons, New York, 1968.
2. Ackoff, R. L. "Rediseñando el Futuro". Limusa, México, 1979.
3. Aldape C., R.; Jalle A., J.; García R., J.; Domínguez P., L.; Martínez M., A. y Ramírez C., J. L. "Los Semáforos y el Control Dinámico del Tránsito". Representaciones y Servicios de Ingeniería, México, 1976.
4. Arthur, L. "Programación lineal: Un nuevo y poderoso algoritmo". Tr. de Héctor Hernández. "Ciencia y Desarrollo", núm. 35, año VI, noviembre-diciembre 1980, CONACYT, México, pp. 185-188.
5. Bridges, J. K. "Historia de las Comunicaciones. Transportes Terrestres". Salvat, Roma, 1965.
6. Cal y Mayor, R. "Ingeniería de Tránsito". Representaciones y Servicios de Ingeniería, México, 1979.
7. Cárdenas, M. A. y otros. "Aplicaciones del Análisis de Sistemas. Métodos, Modelos y Resultados". CECSA, México, 1976.
8. Cárdenas, M. A. "El Enfoque de Sistemas. Estrategias para su implementación". Limusa, México, 1978.
9. Cárdenas, M. A. "La Ingeniería de Sistemas. Filosofía y técnicas". Limusa, México, 1976.
10. Comisión Nacional Coordinadora de Puertos. "Estudio Nacional de Desarrollo Portuario. Resumen". Vol. I, CNCP, México, 1974.

11. Cruz B., G. N. "Sistemas de Transporte". Apuntes de clase. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1979.
12. Churchman, C. W. "El Enfoque de Sistemas". Diana, México, 1979.
13. Churchman, C. W., Ackoff, R. L. y Arnoff, E. L. "Introduction to Operations Research". John Wiley & Sons, New York, 1957.
14. De Buen R., O. "Los Modelos en la Planeación del Transporte Urbano". Tesis Profesional. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1978.
15. Del Valle F., J. A. "Aplicación de la Programación Lineal al Transporte de la Ciudad de México". Tesis Profesional. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1976.
16. Dovalí R., F. "Aeropuertos". Apuntes de clase. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1979.
17. Gámez P., R. O. "Sistemas de Transporte". Tesis Profesional. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1975.
18. Garza C., J. F. "Apuntes sobre Carreteras para la Asignatura de Sistemas de Transporte". Tesis Profesional. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1979.
19. Geoffrey, G. "Simulación de Sistemas". Diana, México, 1980.
20. Hillier, S. P. y Lieberman, G. J. "Introduction to Operations Research". Holden-Day, Inc., San Francisco, 1967.
21. Isunza O., C. "Ingeniería de Sistemas I". Apuntes de clase. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1978.
22. Jachian, L. G. "Un algoritmo polinomial en programación lineal". Tr. de Sara C. de Quintanilla. "Ciencia y Desa-

- ... "Aviación", núm. 36, año VI, enero-febrero 1981, CONACYT, México, pp. 146-148.
23. Méndez A., M. "Modelos Matemáticos y Métodos de Simulación en la Planeación Urbana". Tesis Profesional. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1971.
24. Mendoza, J. M. "Apuntes de Aeropuertos para la Clase de Sistemas de Transporte". Tesis Profesional. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1980.
25. Murillo V., J. L. "Ingeniería de Ríos y Costas". Apuntes de clase. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1980.
26. Ponti, V. "Historia de las Comunicaciones. Transportes Marítimos". Salvat, Roma, 1965.
27. Porrás G., G. "La Programación Matemática en la Asignación de Aviones a Rutas". Tesis Profesional. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1972.
28. Prawda W., J. "Métodos y Modelos de Investigación de Operaciones". Vol. 1 Modelos determinísticos y Vol. 2 Modelos estocásticos. Limusa, México, 1981.
29. Ramírez C., T. de J. A. "Transporte Urbano. Capítulo de los Apuntes de Clase de Sistemas de Transporte". Tesis Profesional. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1980.
30. Sasieni, M., Yaspan, A. y Friedman, L. "Investigación de Operaciones". Limusa, México, 1980.
31. Shamblin, J. E. y Stevens, Jr., G. T. "Investigación de Operaciones. Un enfoque fundamental". Mc. Graw-Hill, México, 1979.
32. Togno, P. "Ferrocarriles". Representaciones y Servicios de Ingeniería, México, 1979.

-33. Vargas, R. J. "Ingeniería de Sistemas IIC: Apuntes de clase". Fac. de Ingeniería, UNAM, 1978. México.

-34. Vargas V. "Modelo de Transporte de Programación Lineal y Aplicaciones". Tesis Profesional. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1975.

-35. Warren, E. W. "Conceptos sobre Ingeniería de Sistemas". Hispano-Americana, Buenos Aires, 1968.

36. Zentella M., O. R. "Aplicación de Programación y Computación a la Dinámica de Trenes". Tesis Profesional. Fac. de Ingeniería, UNAM, 1970.