Directorio de Profesores del Curso Fundamentos y Aplicaciones

De La Ingeniería de Sistemas 1980.

Dr. Felipe Ochoa Rosso
Director General
Felipe Ochoa y Asociados
Ricardo Castro # 54
México 20, D.F.
550 96 88

Dr. Ovsei Gelman
Investigador
Instituto de Ingeniería
UNAM
México 20, D.F.
548 97 93

Dr. Sergio Fuentes Maya
Coordinador
Sección de Investigación de Operaciones
División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería
UNAM
México 20, D.F.
550 52 15 Ext. 4482

M. en C. José Luis Soberanes Ramírez
Director
Area de Ingeniería de Sistemas
ACE Ingenieros Consultores y Constructores, S.A.
Av. Insurgentes Sur 1877-4° Piso
México 20, D.F.
548 39 32

M. en I. Fernando Schutz Estrada
Investigador
División de Fuentes de Energía
Institutode Investigaciones Eléctricas
Leibnitz No. 14 P.H.
México 5, D.F.
531 08 18

M. en I. Francisco Alvarez Caso
Profesor Area de Ing. de Sistemas
División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería
UNAM
México 20, D.F.
651 43 96

M. en I. Arturo Talavera Rodarte
Investigador del Staff de Planeación del
Secretariado Técnico del
Instituto de Investigaciones Eléctricas
Leibnitz No. 14 P.H.
México 5, D.F.
525 64 93

Dr. Eduardo Rivera Porto
Jefe de Proyectos
Fundación Barrios Sierra
Carr. al Ajusco S/N
Col. Pedregal
Fracc. Charrería
Apdo. Postal 20-061
México, D.F.
574 82 99

Ing. José Antonio Esteva Maraboto
Director
Fundación Barrios Sierra
Carr. al Ajusco S/N
Col. Pedregal
Fracc. Charrería
Apdo. Postal 20-061
México 20, D.F.
568 99 67

Dr. José de Jesús Acosta Flores (Coordinador)
Subjefe de la División de Estudios de
Posgrado de la Facultad de Ingeniería
Area de Ingeniería de Sistemas
UNAM
México 20, D.F.
550 52 15 Ext. 4477

M. en C. Marcial Portilla Robertson
Jefe del Departamento de Computación
Facultad de Ingeniería
UNAM
México 20, D.F.
5052 15 Ext. 3746

Dr. Raúl Carvajal Moreno
Investigador
Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas
UNAM
México 20, D.F.
550 00 47

Dr. Javier Márquez Diez Canedo
Gerente
Sistemas del Banco de México, S.A.
Condesa No. 5-4° Piso
México, D.F.
518 05 00 Ext. 215

M. en C. Rodolfo Tellez Gutiérrez
Jefe de la Oficina de Estudios Especiales
Departamento Técnico
Dirección General de Aeropuertos
Chiapas 121-5° Piso
México 7, D.F.
574 82 99

Dr. Jorge Díaz Padilla
Director Técnico
Felipe Ochoa y Asociados, S.C.
Ricardo Castro No. 54-8° Piso
México 20, D.F.
550 96 88 550 90 78

M. en I. Francisco Javier Jauffred Mercado
Director General
Ingeniería de Sistemas
SAHOP
Av. Universidad frente a Mitla
México 12, D.F.
590 30 29

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

DIA	HORARIO	TEMA	PROFESOR
7 de noviembre	17 a 18:30	INTRODUCCION A LA INGENIERIA DE SISTEMAS	DR. FELIPE OCHOA ROSSO
	18:30 a 20	ENFOQUE SISTEMICO	DR. OVSEI GELMAN
8 de noviembre	10 a 11:30	PROGRAMACION LINEAL	DR. SERGIO FUENTES MAYA
	11:30 a 13	MODELOS DE USO DEL SUELO URBANO	M. EN C. JOSE LUIS SOBERANES RAMIREZ
14 de noviembre	17 a 20	PROGRAMACION DINAMICA Y SUS APLICACIONES	M. EN I. FERNANDO SCHUTZ ESTRADA
15 de noviembre	10 a 13	MODELOS DINAMICOS DE FORRESTER	M. EN I. FRANCISCO ALVAREZ CASO
21 de noviembre	17 a 18:30	METODOLOGIA DE LA PLANEACION PROSPECTIVA	M. EN I. ARTURO TALAVERA RODARTE
	18:30 a 20	LA INFRAESTRUCTURA DEL SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE AL AÑO 2000 (modo carretero y ferroviario)	DR. EDUARDO RIVERA PORTO M. EN I. ARTURO TALAVERA RODARTE
22 de noviembre	10 a 11:30	ALTERNATIVAS TECNOLOGICAS PARA EL DESARROLLO	ING. JOSE ANTONIO ESTEVA MARABOTO
	11:30 a 13	ANALISIS ECONOMICO	DR. JOSE DE JESUS ACOSTA FLORES
28 de noviembre	17 a 18:30	SIMULACION	M. EN C. MARCIAL PORTILLA ROBERTSON
	18:30 a 20	MODELOS DE TRANSITO URBANO	M. EN C. JOSE LUIS SOBERANES RAMIREZ
29 de noviembre	10 a 13	PROBLEMATICA DE LA IMPLANTACION DE SISTEMAS DE INFORMACION	DR. RAUL CARVAJAL MORENO

... 2

DIA	HORARIO	T E M A	P R O F E S O R
5 de diciembre	17 a 18:30	SELECCION DE CARTERA	DR. JAVIER MARQUEZ DIEZ CANEDO
	18:30 a 20	ANALISIS DE SENSIBILIDAD EN EL ESTUDIO DE CARRETERAS	M. EN C. RODOLFO TELLEZ GUTIERREZ
6 de diciembre	10 a 11:30	TEORIA DE DECISIONES	DR. JORGE DIAZ PADILLA
	11:30 a 13	INGENIERIA DE SISTEMAS: UNA VISION PANORAMICA	M. EN I. FRANCISCO J. JAUFFRED MERCADO
	CLAUSURA		

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

METODOLOGIA DE LA CIENCIA E INGENIERIA DE SISTEMAS

ALGUNOS PROBLEMAS, RESULTADOS Y PERSPECTIVAS

DR. OVSEI GELMAN

NOVIEMBRE, 1980

cio de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

METODOLOGIA DE LA CIENCIA E INGENIERIA DE SISTEMAS: ALGUNOS PROBLEMAS, RESULTADOS Y PERSPECTIVAS

Dr. O. Gelman.
Instituto de Ingeniería, Investigador

Centro de Investigación Prospectiva, Fundación, Javier Barros Sierra, Asesor Facultad de Administración de Empresas, Universidad de Tel Aviv, Profesor Asociado (en licencia).

Abstract

The place of Methodology in the development of Science and Engineering is studied and presented together with a supporting analysis of different variants of General Systems Theories, considered as answers to a claim, for a new Methodology, the persistense of the claim, due to a proved insufficiency of the interdisciplinary responses, is shown.

A study of the construct "System" and the "General System" definition, constituting the basis of the Systems Approach, is made as a contribution to the new Methodology ; in the framework of this approach an analysis of "Scientific Theory" as afuctional structure is developed. The results obtained allow for a presentation of an effective logical format to planning Systems Engineering Projects.

Resumen

Se presenta un estudio del papel de la metodología en el desarrollo de la ciencia y de la ingeniería, apoyado con un análisis de los orígenes de las variantes de teorías generales de sistemas como respuestas a la demanda por una nueva metodología. Se muestra la persistencia del clamor debido a la insuficiencia manifiesta de las respuestas de tipo interdisciplinario.

Se contribuye a la nueva metodología con el estudio de "Sistema", como forma epistemológica, y con la definición de "sistema general", bases del enfoque sistémico; usando éste, se desarrolla un análisis de "teoría científica" como una estructura funcional. Los resultados obtenidos permiten presentar un formato lógico eficaz para planificar proyectos en ingeniería de sistemas.

INTRODUCCION: Metodología y Ciencia de Sistemas

El papel de la metodología en la ciencia y la ingeniería.

La poca popularidad de la metodología como resultado de:

- la especificidad de las actividades científicas de los especialistas, usando el método de prueba y error, combinación, transformación o traslación de los métodos conocidos, etc.

- la consideración de la metodolofía como una actividad menor y subordinada de la misma naturaleza de las investigaciones específicas.

- carencia de reportes sobre actividades metodológicas.

Un cierto retraso en el desarrollo de la metodología como resultado de:

- una diversidad de metodologías de ciencias especiales; metódicas.

- antecedentes filosóficos pobres, ingenuos y arcaicos de los especialistas.

Del enfoque "naturo-filosófico" al "teórico-cognoscitivo":

- el paradigma de la actividad humana y diferentes papeles del metodizados y el metódologo en ella (fig. 1, 2, 3).

Renovado interés en la metodología. Clamor del período Post-industrial:

- Bunge: es necesario un "Credo" en los cruceros y callejones sin salida.

- Bohr: llamado por una teoría "loca" como resultado de un cambio en el estilo de pensamiento.

- Winer y Rosenblueth; búsqueda de nuevos conceptos.

- Ackoff: demanda por la Sistemología como la base natural de fusión de ingeniería industrial, administración e investigación de operaciones.

- Bertalanffy: llamado por la unificación de las ciencias y búsqueda de leyes isomórficas generales.

Variantes de la Teoría General de Sistemas como respuesta a la búsqueda por una nueva metodología.

Las raíces de la TGS

- un llamado para la unificación de la ciencia: la necesidad de un lenguaje general y de un marco conceptual unificado, surgidos de la creencia en la universalidad y generalidad del mundo y sus leyes.

- la aparición de nuevos y más complicados objetos de estudio (pasando de una simplicidad organizada, a través de una complejidad no organizada, a una complejidad organizada: sistemas de gran escala, hombre-máquina, social, etc).

- el desarrollo de proeblemas nuevos y complejos formando sistemas interconectados.

- nuevos métodos: computadoras y simulación, matematización de las ciencias, modelado.

La insuficiencia de las respuestas:

- la sibernética como un enfoque unificado para el estudio de los fenómenos de control y comunicación en animales y máquinas (nueva presentación de los objetos de estudio).

- Investigación de operaciones en sus primeras etapas como un arte de construcción de modelos específicos para resolver problemas de optimación y toma de decisiones.

- la TGS de Bertalanffy: creencia en leyes isomórficas generales dependientes de la estructura y la organización de los sistemas e independientes de la sustancia del sistema (competencia, homeostasis, cinética generalizada con el modelo de sistema abierto, etc).

- la TGS como una metateoría de modelado: Klir.

- la TGS como una teoría matemática de sistema abstracto: Mesarovic'

- la TGS como una teoría de modelos isomórficos: Rapoport.

- la ingeniería de sistemas para los problemas de diseño y proyección de los sistemas de gran escala (Chestnut, Hall), como medio de planificación y organización de las diferentes actividades, empezando con la definición y el planteamiento del problema, su solución, terminando con su implantación.

Dos conclusiones.

- el desarrollo de todas estas variantes de la TGS no ha disminuído, sino antes, enfatizado la necesidad de estudiar metodología en general y en particular, llevar a cabo estudios específicos sobre qué es un sistema.

- el paradigma sistémico como base de una nueva "revolución científica" (Kuhn) está detrás de todos estos desarrollos: foco de la ciencia y la tecnología contemporáneos.

Algunos resultados de estudios sobre "teoría científica" y definición de "sistema".

El interés creciente en el estudio de teorías científicas se debe:

- al lugar especial en la cognición de las teorías en general, y de las TGS en particular,

- el doble papel que juegan las teorías científicas como medio, y, al mismo tiempo, como sujeto de las investigaciones sistémicas.

La insuficiencia de conocimientos y especificaciones sobre qué clase de teoría es o debe de ser.

- no solo no existen respuestas claras a preguntas cardinales sobre la construcción de la TGS, las preguntas aún no han sido formuladas y estudiadas sobre sujetos como:

* la base y el sujeto de la TGS
* forma y contenido
* especificidades y distinciones de otras teorías no-sistémicas
* vínculos y relaciones con otras teorías
* métodos de confirmación y validación
* fuentes de generalidad y medios para evaluarla, etc.

Crítica de la difundida idea de teoría como un sistema como conjunto ordenado de proposiciones intercectadas (axiomas, hipótesis, postulados, leyes, etc), como resultado de:

- la tendencia dominante a reducir los problemas metodológicos al nivel y las posibilidades de estudios lógicos en general: los cuales han encontrado su expresión en el intento por representar una teoría en la forma de un cálculo lógico interpretado (primer orden);

- utilizar inconcientemente el paradigma específico que constituye la base del enfoque "mecanicista y elementarista", buscando deducir las propiedades del sistema estudiado solamente del estudio de proposiciones y sus relaciones locales.

El problema de la definición de "sistema" y la noción de "sistema general".

- crítica del "convencionalismo"

- la necesidad de una definición general, efectiva y sencilla.

- aspectos metodológicos y espistemológicos de la definición.

  * la distinción entre el "objeto" y el "sujeto" de estudio.

  * el papel de enfoque de investigación (paradigma) en la conformación del "sujeto de estudio", organización de la experiencia.

  * el constructo como el contenido de la definición del concepto.

  * diferencia entre el procedimiento para formar el constructo y el de su subsecuente sustitución por su definición.

- el "sistema general" como un constructo.

  * las fuentes epistemológica y psicológica de dos representaciones específicas del "sujeto de estudio" de la investigación; la integral y la componencial (figs. 4, 5 y 6).

  * el "sistema general" como un constructo formado por estas dos representaciones.

La teoría científica como una estructura funcional.

- la teoría bajo el enfoque integral: la idea de su descomposición funcional.

- el estudio de la estructura "externa" de la teoría como fuente de obtención de susobjetivos globales, considerando el papel y el lugar de la teoría dentro de un sistema más general del conocimiento científico; objetivos tales como el estudio y análisis de:

  * el comportamiento (funcionamiento) y propiedades del objeto

  * su estructura

  * el comportamiento y propiedades de sus elementos o componentes

  * cognición de los mecanismos y procesos responsables del comportamiento y de las propiedades del sistema en su totalidad.

  estos fines son alcanzados a través de determinados funcionamientos de la teoría como:

  * obtención y descripción de hechos.

  * organización de los hechos.(selección, unificación, sistematización, organización, etc).

  * inferencia de principios y leyes empíricas.

  * explicación, predicción y control.

  * obtención de nuevo conocimiento

  * recomendación de esquemas efectivos para el cálculo y la solución de problemas

  * construcción de representaciones ontológicas de la realidad.

- el estudio de la estructura "interna" y en particular de una de sus posibles representaciones; la estructura funcional agregado hipotético de subsistemas interconcectados tal que su funcionamiento asegura completamente, el funcionamiento de la teoría en su totalidad como un determinado sistema conceptual. Alcanzado así este sistema ciertos fines de actividad cognoscitiva dentro de un sistema mayor de conocimiento científico (fig. 8).

* "el campo de estudio": la formulación del problema, su traducción, reducción a una forma estandar, su generalización o reducción, formulación de nuevos problemas, etc.

* "el campo objetivo" "sujeto": para extraer un fragmento definido del mundo objetivo (región objetiva), reconocimiento, selección y descripción, construcción del sujeto de la investigación empírica.

* "modelo": descripción por medio del análisis y la sistematización de hechos utilizando especialmente el objeto abstracto creado.

* "base de la teoría": suministro de las nociones básicas sobre el mundo objetivo: las formas gnoseológicas-paradigmas de Kuhn, organizadores de la experiencia de Bogdanov, los ideales del orden nautral de Toulmin, plantillas de Lefebvre.

  - la fuente de la estructura de modelado, una totalidad de nociones hipotéticas, etc.

  - creación y suministro de multitud de conceptos básicos e iniciales, con sus definiciones y algunos elementos y objetos prestados por otras teorías.

  - suministro de términos lógicos.

* "teoría per se": para predecir y aportar nuevo conocimiento, para explicar y controlar, para el estudio del modelo, hallazgo de leyes e interpretación de resultados a nivel empírico.

* "resultados": para almacenar y entregar resultados en forma específica: leyes y ecuaciones-nuevos constructos, nociones y principios recomendaciones prácticas, previsión científica, etc.

* "medios y métodos": para proveer a otros subsistemas métodos especiales, procedimientos, etc.

Nuevos resultados

Estudios desarrollados como base para:

- comparación de diferentes definiciones de sistema; su clasificación.

- clasificación de teorías científicas: el estudio de su generalización.

- perspectivas para la construcción de toería de sistema general (fig. 9).

Aplicación especial en la Ingeniería de sistemas del marco desarrollado.

- Ingeniería como una actividad especial para construir (diseño e implantación).

- especificidad de la Ingeniería de sistemas: sistemas de gran escala (complejidad y globalidad).

  * organización y coordinación de las diferentes actividades: diseño del proyecto.

- estructura lógica del proyecto:

  * estudio de las dificultades: la problemática.

  * definición de los objetivos.

  * elaboración del paradigma.

  * conceptualización de los sistemas.

  * especificación de los sistemas (medición de parámetros, etc).

  * estudio de las posibles soluciones (diseño nuevos sistemas, rediseño, optimación).

  * estudio de las alternativas de los estados deseados: planificación estratégica.

  * estudio de los posibles senderos para pasar del estado actual al estado deseado.

  * diseño de las acciones concretas necesarias; planificación táctica.

  * Implantación del proyecto con su consecuente adaptación.

Planes para el futuro

Diseño de proyectos

- estudios sobre la descomposición de los proyectos.
- formalización de ciertas etapas.
- clasificación de los proyectos.
- diseño de proyectos estándar

La construcción de la teoría de sistema general como un proyecto de ingeniería

- análisis de las variantes conocidas en la TGS: su tipología.
- los problemas de la unificación de las teorías
- diseño de teorías con especificaciones para ser hecho por computadora

Elaboración de medios lógico-metodológicos efectivos para la descripción, el modelado y el estudio de sistemas.

- estudio de los procedimientos para la formación de constructos, con énfasis específico en "sistema".
- análisis de la relación entre el constructo y el modelo como una diferencia entre las funciones de representación en el primero, y de substitución en el segundo.
- los problemas de la construcción de modelos con la utilización del álgebra moderna.

Estudios del sistema de actividad humana como base de la metodología moderna.

- estructura lógica del proyecto:
  - estudio de las dificultades: la problemática
  - definición de los objetivos
  - elaboración del paradigma
  - conceptualización de los sistemas
  - planteamiento de los problemas
  - especificación de los sistemas (medición de parámetros, etc)
  - estudio de las posibles soluciones (diseño nuevos sistemas, rediseño, optimación)
  - estudio de las alternativas de los estados deseados: planificación estratégica
  - estudio de los posibles senderos para pasar del estado actual al estado deseado
  - diseño de las acciones concretas necesarias; planificación táctica
  - implantación del proyecto con su consecuente adaptación

Planes para el futuro

Diseño de proyectos:

- estudios sobre la descomposición de los proyectos
- formalización de ciertas etapas
- clasificación de los proyectos
- diseño de proyectos estándar

La construcción de la teoría de sistema general como un proyecto de ingeniería

- análisis de las variantes conocidas de la TGS: su tipología
- los problemas de la unificación de las teorías
- diseño de teorías con especificaciones para ser hecho por computadora

Elaboración de medios lógico-metodológicos efectivos para la [illegible], el modelado y el estudio de sistemas

- estudio de los procedimientos para la formación de constructos, con énfasis específico en "sistema"
- análisis de la relación entre el constructo y el modelo como una diferencia entre las funciones de representación en el primero, y de substitución en el segundo
- los problemas de la construcción de modelos con la utilización del álgebra moderna

Estudios del sistema de actividad humana como base de la metodología moderna

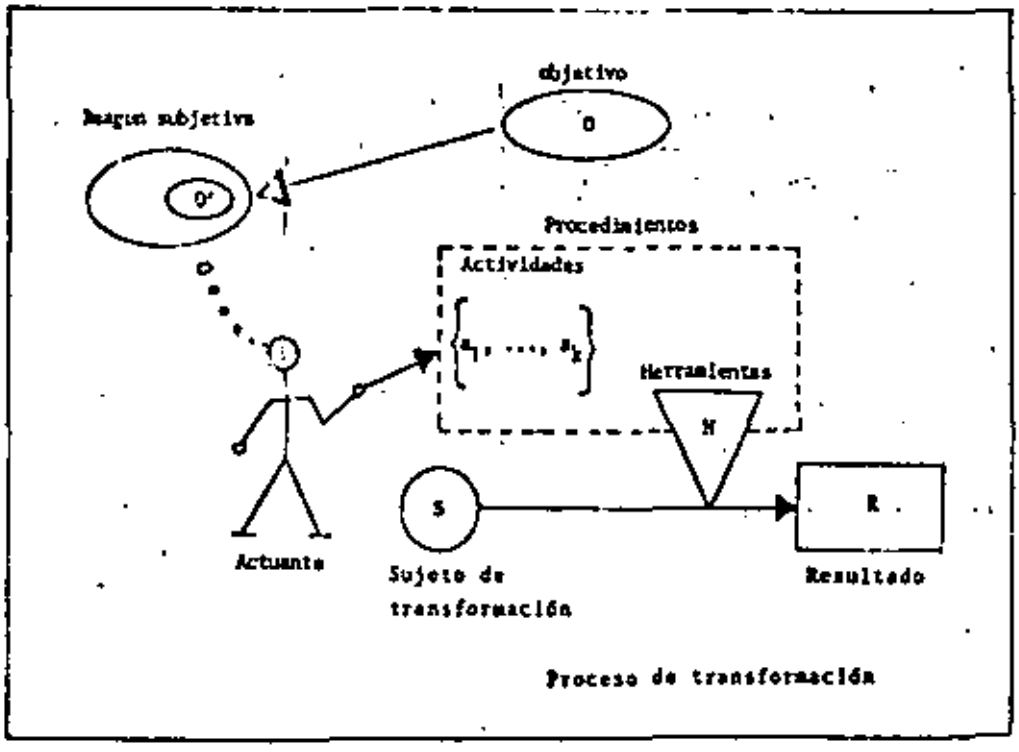


Fig 1 Paradigma de la actividad humana (primera aproximación)

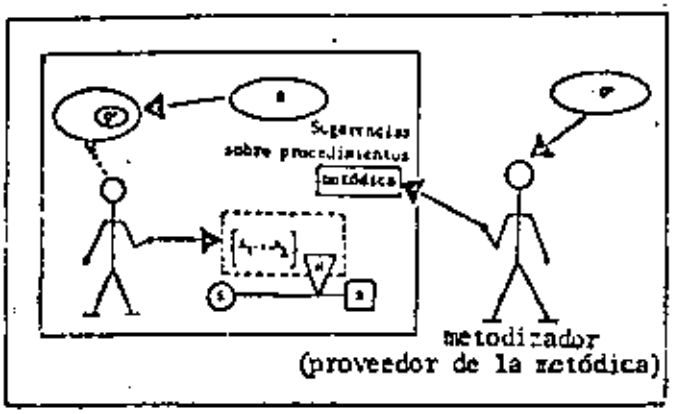


Fig 2 Papel del metodizador en el paradigma de la actividad humana

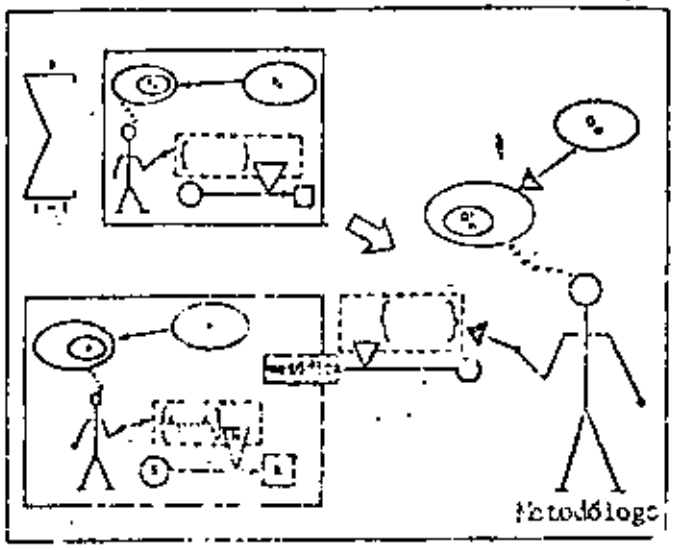


Fig 3 Papel del metodólogo en el paradigma de la actividad humana

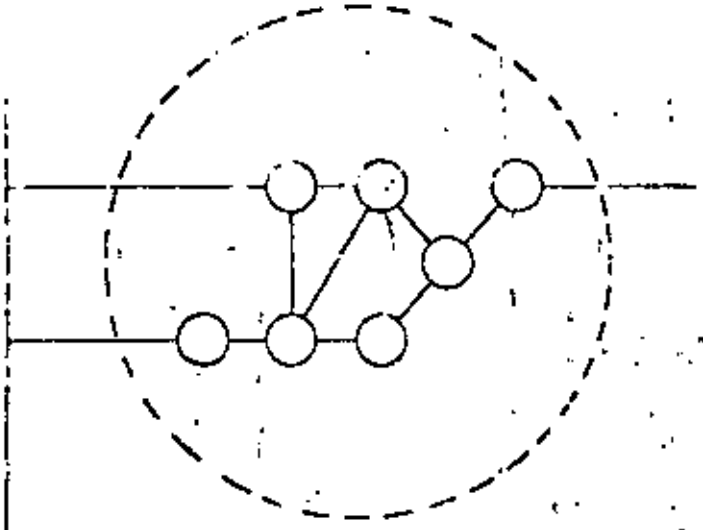


Fig 4 Representación "C" del sistema

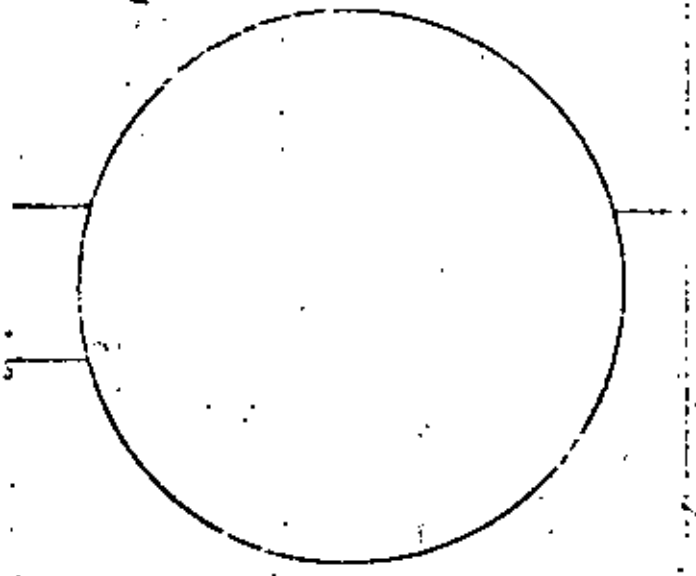


Fig 5 Representación "W" del sistema

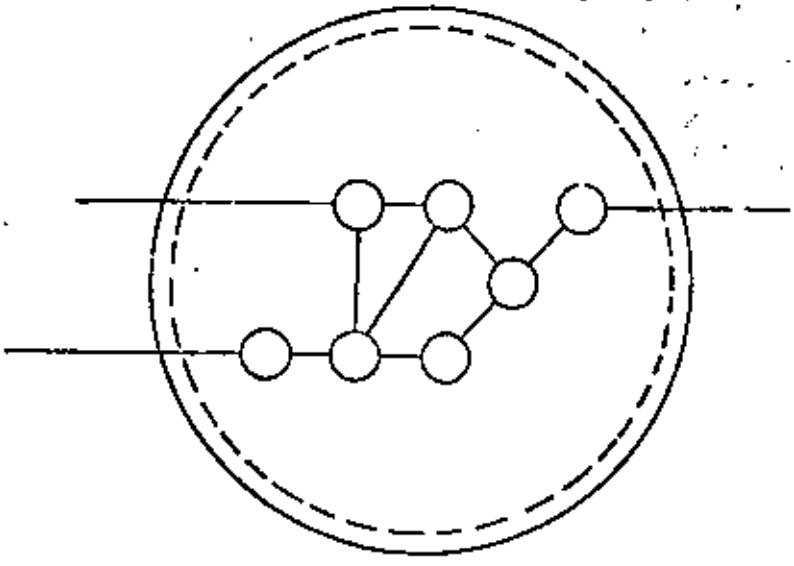


Fig 6 Configuración de las representaciones complementarias del sistema

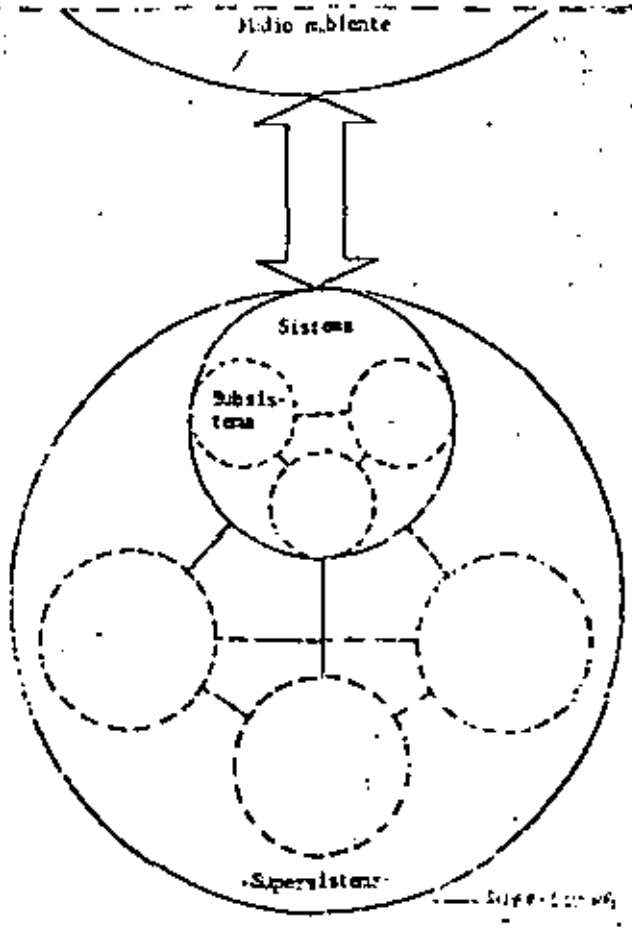


Fig 7 Paradigma de las relaciones entre subsistemas, sistemas, supersistema y medio ambiente

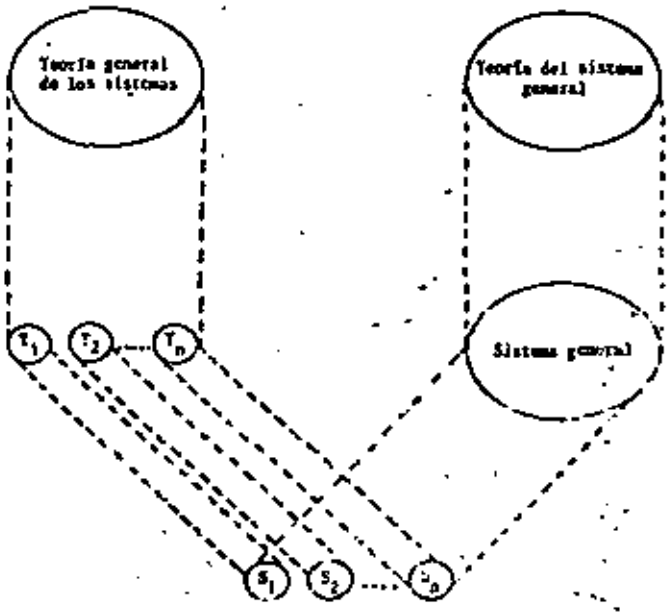


Fig 9 Paradigma para la construcción de dos diferentes conceptos: teoría general de los sistemas y teoría del sistema general

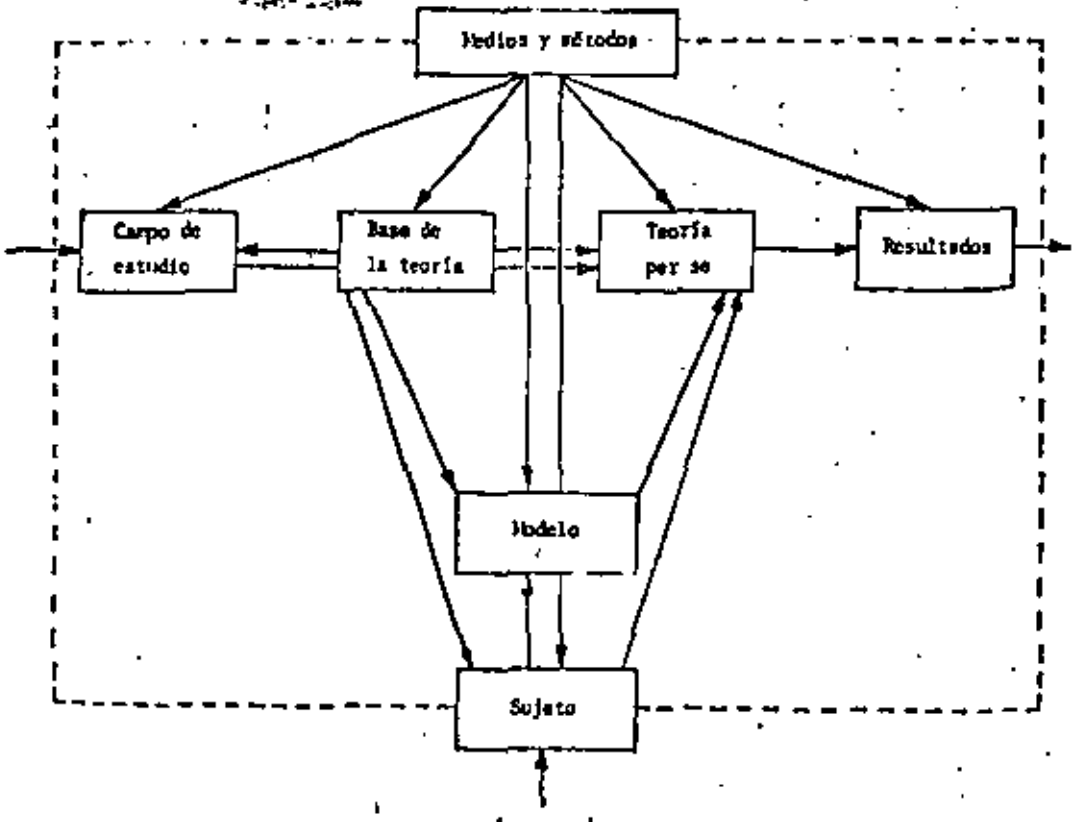


Fig 8 Diagrama de la estructura funcional de la teoría científica (primera aproximación)

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

IMPLANTACION DE SISTEMAS DE INFORMACION: UN PROBLEMA VIGENTE

DR. RAUL CARVAJAL MORENO

NOVIEMBRE, 1980

cio de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

IMPLANTACION DE SISTEMAS DE INFORMACION: UN PROBLEMA VIGENTE

Dr. Raul Carvajal
IIMAS-UNAM

> EL PRINCIPAL PROBLEMA DE LOS SISTEMAS DE INFORMACION ES LA COMPUTADORA.
>
> Elen Peeryco

I) Introducción

El problema de implantación ha sido considerado por diferentes disciplinas a través del tiempo. Está relacionado íntimamente al cambio, más aún, podría definirse como el problema de llevar a cabo cierto tipo de cambio [1]. Dicho cambio puede referirse desde a la transferencia de tecnología, la difusión de conocimientos, la aceptación de recomendaciones de investigación, la implantación de sistemas administrativos hasta al desarrollo de comunidades rurales y los grandes cambios sociales.

Para diferenciar entre las diversas clases de problemas de implantación pueden usarse dos dimensiones: la dimensión sociotécnica y la dimensión individuo-sociedad.

La primera dimensión distingue entre los sistemas tecnológicos, científicos y sociales. Los sistemas tecnológicos y científicos se conceptualizan predominantemente a través de aspectos técnicos y científicos, los problemas relacionados con el comportamiento individual y social son considerados mínimos [2].

En los sistemas sociales es imprescindible el tomar en cuenta al individuo y el grupo. Las variables psicosociales y políticas predominan en el comportamiento del sistema. Por ejemplo, el componer un automóvil puede conceptualizarse como un problema tecnológico mientras que en la organización de un taller mecánico intervienen además variables psicosociales; la modificación de un programa de computación es un problema que envuelve básicamente al programador y la computadora, mientras que el implantar un sistema de información administrativo involucra a gran parte de la organización.

La segunda dimensión describe la extensión del cambio, desde cambios que involucren sólo a un individuo hasta aquellos que modifican a una organización o grupo social. Así, el que una persona adopte una nueva forma para organizar sus documentos depende de una persona, mientras que el modificar las relaciones económicas entre sectores envuelve a gran parte de la sociedad.

Los sistemas de información influyen sobre amplios sectores de la organización, no obstante ser primordialmente de naturaleza técnica, afectan y son afectados de manera profunda por el sistema social. En su implantación intervienen directa e indirectamente muchos individuos y grupos, lo cual implica un cambio social extenso [3].

La complejidad del problema de implantación de los sistemas de información está generado por la emergencia de nuevos fenómenos

conforme se recorren las dimensiones sociotécnica e individuo-social.

Estos fenómenos no son la simple agregación de las variables individuales sino entes totalmente diferentes.

Un grupo es más que la suma de individuos, un sistema de información es más que la suma de componentes.

Al confrontarse un individuo con fenómenos que rebasan su experiencia existe la tendencia a interpretarlos con los esquemas con que cuente. Si son de un nivel micro, se tenderá a interpretarlo como la agregación de las variables individuales.

La formación científica provee a las personas de marcos [4] elaborados, precisos y rigurosos para interpretar, formalizar y resolver ciertas situaciones problemáticas. Así, en computación los problemas de bancos de datos, estructura de datos, actualización de archivos, formas de comunicación con la máquina han generado extensos marcos los cuales caracterizan a un experto en computación.

Por otro lado, proveniente de nuestra experiencia cotidiana tenemos marcos que identificamos con el "sentido común" a través de los cuales conducimos nuestras acciones diarias. De esta forma aprendemos a interpretar las señales de los semáforos, tratamos de interpretar el código de una organización burocrática, pronosticamos las reacciones de otros individuos asociándolos a roles

con expectativas definidas.

Un experto en computación que carezca de formación científica en el área psicosocial interpreta las reacciones de grupos a sus diseños dentro del contexto del "sentido común". Las reacciones negativas o inesperadas las puede atribuir a ignorancia, mala fe o desinterés. En ningún momento sentirá que tiene frente a sí un problema complejo alrededor del cual existe amplia literatura y gente experta. Difícilmente distinguirá que parte del problema ha sido generado por él y que parte es independiente de su persona o grupo técnico responsable del sistema de información.

Esto es, no sólo no tiene una herramienta suficientemente fina para entender el fenómeno sino que ni siquiera se da cuenta de la necesidad que tiene de dicha herramienta para comprender las situaciones con que se confronta en su trabajo.

La situación anterior es particularmente crítica respecto a los sistemas de información para la administración, sistemas que han sido descritas como el sistema nervioso de la organización, es decir, con íntima relación con la organización.

Un sistema de información en general afecta muchos de los subsistemas de la organización, de manera muchas veces profunda y radical, influye sobre el comportamiento individual y colectivo y genera nuevas interacciones. Estos efectos van mucho más allá del simple procesamiento de información, almacenamiento de datos

y generación de reportes. Una organización es un conjunto de partes interrelacionadas que se mantiene dentro de un sutil equilibrio de fuerzas entre sus diversos componentes e individuos. Alteraciones de este equilibrio pueden tener graves consecuencias. La dificultad para implantar sistemas de información podría interpretarse como un mecanismo de defensa de la organización ante posibles cambios catastróficos para algún componente o toda la organización. El proponente de dichos cambios puede tener buenas intenciones al respecto pero actuar con ignorancia interpretando las consecuencias a su propuesta dentro de un marco de "sentido común" peligrosamente simplista. También puede la propuesta encontrarse dentro de una atmósfera de "wishful thinking" donde se percibe la implantación como un monumento a la persona o grupo para ser admirado en la posteridad. Esto es, el ignorar o no darse cuenta de los posibles efectos de la propuesta puede ser un acto racional que obedece al deseo de llevarla a cabo, situación que presenta dificultades especiales puesto que existirá una atmósfera contraria a la reflexión sobre las ventajas y desventajas de la propuesta.

II. Conceptualización del Problema.

En la literatura de investigación de operaciones y sistemas de información gerenciales frecuentemente se encuentran definiciones de la implantación en términos de la relación con los tomadores de decisiones, el cambio social o planeación. Entre estas tenemos: "el uso de los resultados por los tomadores de decisiones" [5] ; "la producción de un cambio social significativo" [1] "la adopción y uso de los resultados por el tomador de decisiones" [6] ; "el diseño de un procedimiento de toma de decisiones y forma de organizarlo de tal manera que se lleve a cabo el plan" [7] . Los factores que influyen en la implantación de un sistema de información los referiremos en especial a los sistemas computarizados. Por esta razón se adoptará la siguiente definición de implantación: el lograr la creación, aceptación y operación de un sistema de información que produzca los resultados esperados en la organización en que se ubica. Los elementos esenciales que intervienen en el problema de implantación son los siguientes:

1. El grupo técnico
2. El grupo de tomadores de decisiones
3. La organización y su medio ambiente
4. Las características del sistema de información
5. La estrategia de implantación

1. EL GRUPO TECNICO

El grupo técnico encargado del diseño y operación de un sistema de información está formado comunmente por personas con educación

formal o informal en ciencias de la computación o disciplinas afines.

Las principales características del grupo técnico que influyen en el problema de implantación son la formación disciplinaria, la estructura y forma de organización del grupo y el ámbito de acción

Formación Disciplinaria.-

Una disciplina es una estructura compuesta de tres conjuntos: materia de estudio, teoría e intrumentos. Dicha estructura está constituída en forma de marco [4], [8].

Un marco es una estructura de datos para representar una situación estereotipada. Así, cuando se encuentra una nueva situación o se hace un cambio substancial en el enfoque a un problema se selecciona de la memoria un marco que se recuerda para adecuarlo a la realidad, cambiando los detalles necesarios. El decidir usar un marco para representar una situación permite emplear toda la información contenida en el marco, no obstante que mucha de ella no se pueda derivar inmediatamente de los datos. Por ejemplo, si se decide que un objeto particular se ajusta al marco "mesa" se asume que tiene 4 patas no obstante sólo se pueden ver dos. Inmersa en cada marco hay información sobre: como usarlo; lo que se espera que suceda; qué hacer si estas expectativas no se confirman.

Los marcos disciplinarios no se construyen arbitrariamente. Se de-

sarrollan a partir de un núcleo constituído por las paradigmas fundamentales de la disciplina. Un paradigma es un patrón o modelo que proporciona un criterio para escoger problemas, que genera un compromiso con cierto tipo de instrumentos y forma en que pueden emplearse con propiedad [9]. La investigación histórica de una disciplina muestra un conjunto de ilustraciones recurrentes y regulares de aplicaciones conceptuales, observacionales e instrumentales de varias teorías. Estos son los compromisos del paradigma revelados en los libros de texto, conferencias y prácticas de laboratorio. Al estudiarlas y al practicarlas los miembros de la comunidad científica correspondiente aprenden su oficio.

Esta profesionalización lleva, por un lado, a una visión restrictiva en el científico y a una resistencia considerable a cambiar o considerar otras paradigmas.

Por otra parte, dentro de las áreas en que el paradigma dirige la atención del grupo, la investigación conduce a una precisión e información detallada sobre la concordancia de la observación con la teoría.

El marco disciplinario puede pensarse como una red con nodos centrales constituídos por las paradigmas y áreas que se construyen por medio de la teoría e instrumentos de la disciplina donde está inmersa la materia de estudio. La información del mundo externo es filtrada e integrada a través de dichos marcos.

De esta forma se tienen los "enfoques consentidos" características de cada disciplina.

En las ciencias de la computación además del enfoque particular introducido por dicho marco disciplinario existe un elemento que introduce características peculiares: la computadora. La computadora tiene efectos profundos sobre la forma de pensar y psicología en la gente.

Para Weisenbaum [10], la gente se forma toda clase de ligas emocionales con máquinas y, en especial, hacia las computadoras. El hombre transforma ciertos instrumentos en extensiones de un cuerpo internalizando aspectos de ellas en forma de hábitos y percepciones. La computadora es un instrumento diferente, no es extensión del cuerpo, es procesador de información alrededor del cual emergen ideas de "justicia", imfalibilidad e indispensabilidad. La creencia en la indispensabilidad de las computadoras no es del todo errónea ya que una vez que han sido íntimamente integradas en una estructura no pueden separarse sin afectar mortalmente a toda la estructura. La creencia en la "justicia", inflexibilidad e infalibilidad se basan en su carácter de máquina "inteligente" no sujeta a las debilidades humanas y cuyas "intenciones" no pueden objetarse. Es el paradigma de la racionalidad.

Argumentar que la computadora ha llegado en el preciso momento para salvar a muchas instituciones nos hace cuestionar sobre la conveniencia de dichas instituciones que, sin la llegada de dicho instrumento, hubieran sido radicalmente renovadas bajo las presiones a que estaban sujetas.

La computadora ayudó a abrir la puerta al espacio exterior, pero también ha cerrado otras puestas. En general es falso el mito de que las decisiones importantes están siendo hechas por las computadoras ya que la gente se reserva el derecho de hacer decisiones basadas en los resultados de los procesos de computación. Pero un sistema computacional que sólo permite ciertas preguntas, acepta sólo cierto tipo de datos y no puede ser entendia en principio por aquéllos que confían en el sistema, ha cerrado, efectivamente, muchas puestas que estuvieron abiertas antes de su instalación.

La programación se asemeja a un juego. Para programar no es necesario el saber nada sobre aquellos aspectos del mundo real de los cuales trata el programa. El programador más que verse como un traductor de lenguajes, se ve como un creador de universos en las cuales únicamente él da las leyes. Es un sacerdote que interacciona con los simples mortales y la "gran máquina".

Uno estaría sorprendido si la observación de que el poder corrompe no se aplicara en un ambiente donde la omnipotencia se logra tan fácilmente. La corrupción invocada por la omnipotencia del programador se manifiesta más allá del ambiente de la computadora. Para entenderla hay que observar un antiguo problema mental transformado por la computadora en una nueva clase: la computación: la compulsión a programar. En los centros de cómputo aparece gente desaliñada, con ojos vidriosos esperando compulsivamente interactuar con la computadora en los teletipos o analizando en estado febril sus listados. Se asemejan a jugadores profesionales. Existen sólo

para y a través de la computadora.

A diferencia del profesional que considera la programación como un medio para un fin, el programador compulsivo se dedica a grandes proyectos que frecuentemente tienen la calidad de ilusiones de grandeza. Proyectos que reubicarán en centros de gravedad de la organización en el lugar justo, infalible e inflexible: la computadora.

La situación sicológica del programador compulsivo es determinada por dos hechos contradictorios: primero, sabe que él puede hacer que la computadora haga lo que sea; segundo, la computadora constantemente genera evidencia innegable de sus fracasos. La computadora reta su poder, no su conocimiento.

Esta situación puede fácilmente extenderse a la relación entre el sistema de información y la organización. El grupo técnico sabe que puede crear cualquier flujo de información en la organización. La organización constantemente lo hace fracasar en sus intentos de implantar sistemas grandielocuentes. Los esfuerzos para mejorar y promover sus sistemas tienen como consecuencia el renovar la lucha contra la organización. Si se les impide sabotear su propio trabajo se deprimen y pierden interés.

El paralelo más cercano a este tipo de psicopatología es el incansable esfuerzo que caracteriza la vida del jugador compulsivo. El jugador, según el psicoanalista Edmund Bergler, tiene tres creencias principales: tiene la certidumbre de que va a ganar; tiene

fe ilimitada en su propia astucia; cree que la vida no es más que un juego. Por lo tanto, el jugar compulsivo se vé a sí mismo no como la víctima sino como el brazo ejecutor del azar.

La formación disciplinaria e influencia de la computadora frecuentemente impulsan grandes proyectos impregnados de omnipotencia, los cuales difícilmente llegan a realizarse permaneciendo como fantasmas en el mundo interior del individuo. En psicología ha sido reconocida la influencia que los problemas no resueltos tienen sobre nosotros. Los grandes proyectos inconclusos reaparecen cada vez que nos confrontamos con situaciones problemáticas análogas, tomando muchas veces mayores proporciones. Hay que cuidarse de los grandes proyectos construídos sobre los grandes fracasos.

En este punto es conveniente hacer una nota aclaratoria: no obstante se han enfatizado los problemas individuales del grupo técnico estos no son los únicos ni los dominantes en relación a la implantación. En muchas ocasiones gran parte de las dificultades son externas pero en otras ocasiones son generadas por el propio grupo técnico. Una actitud sana cuando se explora un problema es el asumir que la mitad se genera internamente por el individuo o grupo técnico y la otra mitad proviene del exterior. Esta actitud implica el tomar una orientación hacia la reflexión que incluye al individuo y la organización, evitando el caer por un lado en actitudes negadoras por parte del individuo culpando a objetos, individuos o grupos externos; por otro lado evitando asumir una posición de víctima al creer que la causa o culpa son exclusivamente del individuo.

La anterior observación tiene mayores consecuencias que el logro de la objetividad, puesto que indica una estrategia en la solución de problemas o implantación de sistemas. Si en una situación el problema principal es generado por el grupo técnico y el grupo técnico lo considera externo, tratará de manipular variables externas como el tomador de decisiones o la estructura de poder que en dicho caso poco incidirán sobre el problema. Por otro lado, si el problema principal proviene del exterior el grupo técnico asume que es generado por su forma de actuar, tratarán inútilmente de cambiar su comportamiento individual y de grupo sin lograr influir sobre el problema puesto que es externo a ellos.

Estructura del Grupo.-

En un grupo se pueden distinguir dos tipos de actividad: las orientadas hacia la tarea y las de mantenimiento del grupo. Así, el diseño de un sistema de información, la revisión de los datos de entrada del sistema y la elaboración de los programas son actividades identificadas con la tarea. Reuniones sobre discusión de problemas del grupo, comidas y celebraciones son actividades de mantenimiento.

Los grupos técnicos que diseñan y operan sistemas de información regularmente están sujetos a fuertes tensiones generadas por demandas súbitas y fechas de entrega próxima, que se conjuntan con problemas inesperados. Las ventajas de los sistemas de información en términos de velocidad de respuesta, manejo masivo de datos

que posibilita el diseño de sistemas centralizados y la posibilidad de interacción en tiempo real se transforman en fuentes de presión hacia el grupo técnico. Esto es, la velocidad y capacidad del sistema tecnológico impone severa tensión sobre el sistema social, específicamente el grupo técnico [2].

El problema del liderazgo, uno de los centrales en los grupos, se incrementa bajo estas presiones. Las características autoritarias se acentúan sobre las democráticas especialmente en las situaciones de crisis. Una analogía puede observarse en el comportamiento de los cirujanos a diferencia de los dermatólogos. Un cirujano frecuentemente tiene un estilo personal autoritario acentuado por las tareas críticas a que se tiene que confrontar con frecuencia. Un dermatólogo puede ser autoritario o no dependiendo de su personalidad pero el ambiente de trabajo no contribuye a que se acentúen ciertos rasgos.

En ocasiones los grupos técnicos proponen soluciones que los llevan a su propia destrucción. Así, el centralizar todas las funciones de cómputo de una organización junto con el diseño e implantación de sistemas computarizados concentra un potencial explosivo tremendo. En caso de lograrlo, una falla o un error inmediatamente generan un alud de quejas y hasta agresiones. El ideal del centralismo omnipotente lleva encerrado un infierno esclavizante.

En una ocasión el jefe de un departamento de sistemas expresó que debía valorarse su función de "absorber los fracasos". Esto es, si algo fallaba en la organización la culpa última la tenía el

departamento de sistemas. A continuación agregaba en tono amenazante: "pero cuando tengamos el control de la información nos la van a pagar". Aparentemente sus deseos de omnipotencia se alimentaban en las agresiones y fracasos que continuamente sufrían.

Recapitulando, además de las variables estructurales formales [17], los problemas que sufre el grupo técnico están fuertemente incfuídos por su formación disciplinaria, el diseño de la tarea y el medio ambiente. El no distinguir en cada situación específica el origen del problema genera soluciones equivocadas que mantienen e incrementan los problemas en lugar de resolverlos.

2. EL GRUPO DE TOMADORES DE DECISIONES

Uno de los temas más estudiados respecto al problema de implantación es la relación entre el grupo técnico y los tomadores de decisiones.

Churchman y Schainblatt [6] en uno de los artículos más importantes sobre implantación de las propuestas de investigación de operaciones y ciencias de la administración se concentran en dicha relación produciendo una tipología en término de la actitud del grupo técnico hacia los tomadores de decisiones:

Función Separada.-

La función del técnico o científico es el producir una solución o diseño. La implantación corresponde a otros elementos.

El investigador no tiene que entender al administrador ni viceversa.

Comunicación.-

Las ventajas de la propuesta del investigador deben ser evidentes por lo cual el problema se traduce en hacer que se comprendan. Es necesario ilustrar o educar al administrador sobre el área técnica.

Persuasión.-

Los administradores actúan en base a objetivos no manifiestos. Cada diferente tipo de personalidad responde diferente a las propuestas. El investigador debe estudiar al tomador de decisiones con objeto de descubrir sus motivos ocultos y determinar su estilo gerencial con objeto de persuadirlo y venderle la propuesta.

Entendimiento Mútuo.-

Esta es la posición ideal que proponen. En ésta el investigador debe comprender, más aún, transformarse parcialmente en administrador y el administrador en investigador.

Para que un cambio se lleve a cabo deben conjuntarse tres condiciones: debe saberse como hacerlo; debe quererse hacerlo; y debe poderse hacerlo.

El saber implica no sólo un conocimiento del sistema técnico en sí sino los requerimientos e implicaciones del sistema de información sobre la organización. Un sistema de información no es sólo una computadora, sino que incluye el flujo de datos. Tiene que construir una red análoga a la de distribución eléctrica donde los problemas de transmisión pueden ser equivalentes o aún mayores a los de generación. El problema de conocimiento abarca áreas técnicas, sociales y, en general, la estructura de la organización y su medio ambiente.

El segundo problema es el de la motivación, el querer producir el cambio. Depende de los objetivos y valores del grupo de tomadores de decisiones, la dificultad de transición, las ventajas y desventajas tanto reales como percibidas. Un cambio puede no hacerse porque se cree que sus desventajas son superiores a sus ventajas no obstante sea contraria a la realidad. A su vez, puede impulsarse un cambio cuando en realidad las desventajas superan a las ventajas. Esto es un problema de incongruencia entre lo que se cree que es y lo que es, el cual se tratará en la parte relacionada con las estrategias. El análisis de las ventajas y desventajas rebasan el área puramente técnica al incluír los recursos necesarios, la situación de conflicto existente en la organización, el tiempo en que pueden obtenerse los resultados, la probabilidad de obtenerlos, el poder que es necesario ejercer para hacer posible la implantación, etc.

Los tomadores de decisiones establecen un umbral de compromiso con el cambio, es decir, cuando el esfuerzo o requerimientos exceden

dicho umbral el cambio no es deseable. Una de las complejidades del problema de implantación radica en la variabilidad del umbral en el tiempo. Así, si el tomador de decisiones sufre un cambio en su apreciación sobre el tiempo que va a permanecer en la organización pensando que será relativamente breve, cambios que requieran alta energía y con resultados a largo plazo tendrán menor importancia que aquéllos que produzcan resultados dentro del período en que piensa permanecerá en la organización. El caso extremo de este problema es cuando se cambia al tomador de decisiones.

El tercer problema son las posibilidades reales que se tienen para hacer el cambio, es decir, lo que se puede hacer. Un cambio puede desearse, saber como hacerlo pero no tener la potencialidad para hacerlo. Uno de los factores limitantes es el poder real que tiene un tomador de decisiones y las limitaciones que le impone la organización y el medio ambiente. Hay situaciones en que un grupo es visto como un cuerpo extraño por una organización y sujeto a un proceso de rechazo o encapsulamiento. Si el tomador de decisiones se encuentra en dicha situación sus posibilidades de promover un cambio son muy reducidas. Otro caso es aquél en que el tomador de decisiones quiere producir cambios en otras unidades con las cuales está en conflicto. Una tercera situación se presenta alrededor del sistema que se diseña. Un sistema requiere de cierta energía para mantenerlo en funcionamiento. Por ejemplo, procesos de obtención de datos muy extensos y que requieren de la participación de muchas personas implican un amplio esfuerzo de recolección, supervisión, validación, corrección de errores y de desviaciones. La

cantidad de energía que se requiere para mantenerlo es muy elevada.

Un sistema que requiera alta energía de mantenimiento depende críticamente de la capacidad de generación de dicha energía y será, por lo tanto, más vulnerable que un sistema de baja energía. Si el tomador de decisión no es capaz de generar en forma contínua energía de mantenimiento, no podrá mantenerse el cambio. Entre los problemas relacionados con los tomadores de decisiones tenemos además:

a. Resistencia al cambio
b. Miedo a ser manipulado
c. Estilo de decisión
d. Grado de defensividad
e. Conformismo
f. Antagonismo
g. Fracaso sicológico y doble dilema

Los sistemas de información y, en particular los gerenciales, tienen fuerte impacto sobre la administración. Entre sus efectos no planeados está la reducción del espacio libre de acción del tomador de decisiones al incrementarse el riesgo de que emergan comportamientos, políticas o normas que operan "bajo la superficie"; pueden producir un sentimiento de "fracaso psicológico" el cual ocurre cuando las metas individuales se definen externamente así como las estrategias, niveles de aspiración y criterio de éxito; dilemas dobles que surgen en situaciones en los que si el tomador de decisiones adopta la nueva racionalidad tiene éxito como administrador pero

fracasa como persona; tendencia que el liderazgo se base más en la capacidad que en el poder; demanda de una nueva forma de pensar en las personas [11], [12], [13].

La reacción contra los sistemas de información muchas veces surge de amenazas reales sobre los tomadores de decisiones.

3. LA ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL Y SU MEDIO AMBIENTE

Entre los principales variables relacionadas con la organización que afectan los sistemas de información está el lugar de ubicación del sistema (finanzas, ventas, producción, personal, investigación y desarrollo, etc.), el nivel de sistema (estratégico, operacional, táctico, o de control), el tamaño de la organización, los recursos, la madurez de la organización y el clima psicológico [11], [12], [13], [14], [15], [16].

En general, tres factores emergen como fundamentales: la jerarquía, la especialización y la centralización. Estas variables definen la estructura formal de la organización. Una organización generalmente vive en medio de conflictos interdepartamentales e interinstitucionales que pueden ir desde simples desaveniencias hasta guerras no declaradas. Entre mayores sean los conflictos podemos asociar un valor más alto a un "índice de paranoia" de la institución que mide la supervivencia del grupo u organización.

El grado de paranoia puede interpretarse en términos de una función de optimización de un departamento de la organización. Si la fun-

ción objetivo formal es:

$$\text{maximizar} \quad c(X)$$
$$\text{sujeto a} \quad G(x) \geq 0$$

la paranoia podría expresarse como:

$$\text{maximizar} \quad c(X) - p(X) \cdot D$$
$$\text{sujeto a} \quad G(X) \geq 0$$

donde p(x) es la probabilidad de que al adoptar el conjunto de acciónes x sufra el daño de eliminación D. Entre mayor sea el grado de paranoia mayores serán los valores de la función p(.) y, como D es grande, la función de optimización será aproximadamente:

$$\text{minimizar} \quad p(x)$$
$$\text{sujeto a} \quad G(x) \geq 0$$

esto es, minimizar el riesgo de eliminación.

Esto quiere decir que, en situaciones altamente paranoicas, el objetivo de un área o departamento de la organización, en lugar de ser maximizar la efectividad expresada en términos de c(x) se convierte en minimizar el riesgo de eliminación expresado en p(x).

Si no se es consciente de esta situación aparentemente el departamento se comportará de manera irracional, o sea, bajo la racionalidad de p(x).

En este contexto, un sistema de información que comunique a dos departamentos en conflicto sufrirá consecuencias análogas a la conexión de dos polos de alto voltaje, correspondientes a altos valores de p(x). Esta situación se traduce en una resistencia para compartir información. En general, la información que no se comparte son los datos, fuentes de datos, técnicas de recolección de datos, programas para procesar datos, interpretación de datos e información sobre quien tiene acceso a lo anterior. Las ventajas de no dar información, a parte de no morir electrocutado, son el protegerse de invasiones de autoridad, protegerse a sí mismo sobre lo que constituye la realidad relevante, el mantener la capacidad de negociaciones por poder y estatus y el vivir y dejar vivir. Información válida revelaría una enorme cantidad de encubrimiento de errores y actos irregulares, elaboradas ficciones, incompetencia, oportunidades perdidas y desconfianza [12], [13].

4. EL SISTEMA DE INFORMACION.

El proceso de conceptualización, diseño y aceptación del diseño afectan profundamente la implantación y operación del sistema. Si un grupo diseña, conceptualiza y construye un sistema de información y otro grupo ajeno es el encargado de la operación y no ha tenido participación alguna en la etapa anterior, difícilmente aceptará la concepción inicial. Muchos problas de implantación se originan en la etapa de conceptualización [35] [36].

Los sistemas de información pueden sufrir un rechazo racional debido a que representan soluciones equivocadas o incosteables a los problemas de la organización [5]. Así, si en el diseño del sistema se ignora el índice de paranoia y se propone conectar dos áreas en conflicto, el sistema puede ser rechazado racionalmente. Una situación análoga puede surgir cuando el área dentro de la cual se ubica el sistema de información es una de las zonas de conflicto. Tendrá mucha dificultad en lograr esquemas colaborativos con áreas fuera de su zona, especialmente si existen dudas sobre su neutralidad e imparcialidad.

Otro factor que influye en la implantación son los recursos que requiere el sistema de implantación y la energía de mantenimiento [15], [16], [23]. Conforme sea mayor la cantidad de recursos las decisiones de ubicarán a más alto nivel y criterios más globales y políticos serán los dominantes.

Los sistemas de información pueden orientarse a la planeación y toma de decisiones, a la integración de un modelo de la organización, a ser bancos de datos o instrumentos de detección y control. La orientación que se escoja es decisiva en el futuro del sistema [25], [26].

Los problemas a que se confronta la implantación de un sistema de información pueden heredarse del sistema del cual son parte. Por ejemplo, si un sistema de información es parte de uno de control, el cual incluye a los tomadores de decisiones, detección y diagnóstico de síntomas, si el sistema de control es deficiente la contri

bución del subsistema de información será muy limitada. Esto es, para tener un subsistema de información sano se requiere que el sistema de control del cual es parte sea sano.

El sistema de control puede, a su vez, ser parte de un esquema programático que incluya la programación, ejecución y control del programa [7]. Si el programa está pobremente concebido no tendrá gran repercución el sistema de control.

A su vez, si el programa está inmerso en la estructura de poder e intereses de la organización y su medio viviente y su operación se contrapone fuertemente a dicha estructura, generará reacciones contrarias que pueden anularlo a menos que se tomen las medidas pertinentes.

Los objetivos del sistema, diseño estructural y estrategia de implantación deben considerar los factores antes mencionados. En general, puede asumirse que los problemas a que se confrontan los sistemas de información tienen causas racionales.

III. ESTRATEGIAS DE IMPLANTACION.

1. APRENDIZAJE SEGUN EL MODELO II.

Las estrategias de implantación se ubican dentro de procesos específicos de comportamiento y aprendizaje. Muchas de las dificultades provienen de los esquemas de aprendizaje en que está embebida la implantación. Argiris y Schon [34] han caracterizado en forma sintética dos estrategias que han denominado modelo I y II. Se basan en el concepto de teoría expuesta y teoría en uso.

La teoría expuesta es aquella reflejada en lo que la gente dice que haría en una situación dada. La teoría en uso es aquella que gobierna los actos de un individuo. En base a la teoría en uso se [illegible]gen las estrategias de acción las cuales tienen consecuencias sobre el mundo real.

Las variables que gobiernan el comportamiento de un individuo acorde al modelo I son las siguientes:

a. Definición de metas en forma unilateral.
b. Maximización de ganar y minimización de perder.
c. Hay que minimizar el generar o expresar sentimientos negativos.
d. Hay que ser racionales y minimizar la emotividad.

Las estrategias de acción de un individuo acorde con las variables anteriores son las siguientes:

a. Diseñar y manejar el ambiente unilateralmente, ser persuasivo.
b. Apropiarse y controlar la tarea.
c. Protegerse unilateralmente a sí mismos. Hablar en categorías inferidas no verificables, no darse cuenta de las incongruencias entre lo que se dice y lo que se hace, reducir dicha incongruencia a través de acciones defensivas como acusaciones, estereotipos o intelectualizaciones.
d. Proteger unilateralmente a otros. Ocultar información, crear reglas de censura de información y comportamiento, llevar a cabo reuniones privadas.

Estas acciones tienen las siguientes consecuencias en el mundo real:

a. La persona se percibe defensiva, incongruente, competitiva, controladora, con miedo a ser vulnerable, manipulador, sin sentimientos y preocupada en sí misma.
b. Las relaciones interpersonales y de grupo son defensivas, dependencia en sí mismo y poca ayuda a otros.
c. Normas defensivas. Desconfianza, aversión al riesgo (alto índice de paranoia), conformismo, énfasis en diplomacia, competencia centrada en poder y rivalidad.

Los comportamiento generados no son verificables, hay poca comprobación pública de teorías, mucha comprobación privada. La efectividad de las acciones es decreciente.

Las hipótesis básicas en que se basa el modelo I son:

a. Es un mundo en el que se gana o se pierde.
b. Otras personas se comportan de acuerdo a las hipótesis del modelo I.
c. El comportamiento racional es el más efectivo.
d. La prueba pública de hipótesis es un riesgo intolerable.

Las actitudes defensivas, barreras temperamentales y resistencia al cambio que exhiben tanto los miembros del grupo técnico como los tomadores de decisiones y personas involucradas pueden explicarse en gran número de los casos en términos del comportamiento indicado en el modelo I. La mayoría de la gente se comporta acorde al modelo I, ya que dicho comportamiento se aprende desde la niñez, en la familia, en la escuela y en el trabajo. En contraposición al modelo I se tiene un modelo ideal denominado modelo II.

L. MODELO II.

Las variables rectoras del modelo II son las siguientes:

a. Maximizar la información válida. La persona provee a otros con datos directamente observables y corrige reportes de otros de tal forma que hagan inferencias válidas sobre la persona.
b. Maximizar las decisiones libres e informadas. Una decisión es informada si se basa en la información relevante. Una decisión es libre en el grado en que la persona pueda definir sus propios objetivos, definir como lograr dichos objetivos, defi-

nir objetivos que están dentro de sus capacidades, relacionar sus objetivos a necesidades centrales de la persona en cuyo logro no se requieran emplear mecanismos de defensa. En la medida en que un individuo no puede controlar su comportamiento se vuelve compulsivo y repetitivo.

c. Maximizar el compromiso interno hacia las decisiones tomadas.

Estos tres puntos están íntimamente relacionados. La información válida es esencial para una decisión informada; una decisión libre depende de la capacidad de la persona para seleccionar objetivos que representen un reto dentro de límites tolerables. Un individuo está más comprometido a una decisión libre. Una persona que se sienta responsable por sus decisiones tenderá a supervisarla para que se implemente adecuadamente, tenderán a producir una retroalimentación para corregir errores y detectar consecuencias no deseables por lo que tratarán de obtener información válida.

Las estrategias de acción generadas por dichas variables son las siguientes:

a. Hacer que el diseño y control del ambiente sea una tarea bilateral. Se tratará de diseñar situaciones donde se pueda experimentar y producir alto grado de logros personales, éxito psicológico, confirmación y esenciabilidad.
b. Hacer que la protección propia y de otros sea una operación conjunta.
c. Hablar en categorías directamente observables.

Las consecuencias para el mundo real son las siguientes:

a. La persona se percibe como minimamente defensiva, actúa como facilitador de tareas, colaborador y creador de opciones.
b. Las relaciones interpersonales son poco defensivas.
c. Las normas son orientadas al aprendizaje. Se genera confianza, se protege la individualidad y hay confrontación abierta sobre problemas difíciles.

En términos de aprendizaje los procesos pueden dejar de confirmarse, existe un aprendizaje de loop doble y hay una comprobación pública de teorías. En términos de calidad de vida hay una mayor autenticidad y libertad de elección, hay un incremento en la efectividad para resolver problemas.

2. ESTRATEGIA DE DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACION.

Ein Dor y Segev [26] identifican cinco filosofías en las que se sustentan los sistemas de información:

a. De arriba hacia abajo (top-down), donde las necesidades de información son especificadas a partir de un modelo de la organización procediéndose después al diseño del sistema de información [33].
b. De adentro hacia afuera (inside-out), donde se explota la computadora conforme se presentan las oportunidades en la generación de planes de desarrollo procediéndose a integrarlos después con las otras funciones.

c. Paralela, donde se desarrollan en paralelo sistemas relacionados con la operación y la administración, estableciéndose ligas de retroalimentación entre ambos.

d. De abajo hacia arriba (bottom-up), donde se construyen primero módulos de operación integrándolos progresivamente en un sistema más amplio.

e. Modular, donde se desarrollan los sistemas conforme surge la necesidad y se integran cuando se presenta la posibilidad.

En general, entre más estructurada esté la organizaoión los enfoques más globales tendrán mayor probabilidad de éxito.

Las organizaciones son sistemas socio-técnicos de gran complejidad donde la estructura, tareas, objetivos y funciones formales se integran a estructuras informales, objetivos no declarados, en atmósferas conflictivas y situaciones aparentemente irracionales.

Si para implantar un sistema de información es necesario el conocer a fondo la organización la tarea se presenta como imposible puesto que puede llevarse muchos años el alcanzar el conocimiento necesario. Por esta razón, entre más compleja y menos conocimiento se tenga de la organización, las estrategias de implantación de los sistemas de información deben enfatizar el aspecto de aprendizaje del sistema.

Una estrategia de aprendizaje debe incluir conceptos como los del modelo II de Argiris y Schon. Esto es, un proceso de reflexión sobre el desarrollo del diseño, implantación y operación del sis-

tema. Además debe tenerse un conocimiento teórico sobre los diferentes factores que influyen en implantación, tanto individuales como de grupo, de la organización y de la tarea. La estrategia de implantación debe permitir verificar y conocer las variables que influyen en dicho proceso y sus formas de interacción.

La estrategia que a continuación se esboza se basa en los siguientes supuestos:

a. El grupo técnico no conoce con la profundidad necesaria a la organización y su medio ambiente.
b. Un sistema de información es parte de un sistema mayor.
c. El grupo de tomadores de decisiones se transforma constantemente.
d. Se asume la posibilidad de existencia de una atmósfera paranóica.
e. Los diseñadores son capaces de reflexionar en forma abierta sobre sí mismos, el sistema de información y la organización.

Se propone una estrategia modular en la cual los módulos contengan desde aspectos de información hasta relacionados con la operación, incluyendo la programación, el control y el proceso de toma de decisiones. Cada módulo debe adaptarse a la estructura de la organización tomando en cuenta la estructura de poder y grado de paranoia.

Ilustraremos la estrategia a través de un ejemplo. En lugar de iniciar el diseño de un sistema de información global, el subsistema de información se restringiría a la parte indispensable para que funcione el sistema de control-aprendizaje. El sistema de control, además del subsistema de información debe incluir parte del proceso de toma de decisiones, detección de síntomas y presíntomas, verificación del cumplimiento de expectativas y diagnósticos de desviaciones. Pero en lugar de construir un sistema de control global para toda la organización se consideraría sólo una área específica correspondiente no a una función sino a un programa integrado. El programa debe incluir, a su vez, objetivos específicos, una planeación, una estructura organizacional, recursos y el subsistema de control. El funcionamiento del programa, al incidir en la organización y su medio ambiente, sufre los efectos de la estructura de poder, grupos de intereses y otras áreas de la organización, efectos que pueden invalidar al programa. Si ésto ocurre, el sistema de control y subsistema de control son irrelevantes. Por otra parte, al confrontarse con dichos fenómenos los diseñadores y tomadores de decisiones pueden diseñar estrategias específicas que contrarresten los efectos adversos.

Una estrategia global de diseño de un sistema de información incurre en los siguientes riesgos:

a. Posiblemente nunca se implemente.
b. De implementarse se confrontará con problemas de no adecuación con el sistema de control.

c. Si el sistema de control, del cual es parte el de información, es irrelevante el de información también será irrelevante.

d. Puede intentarse la implantación de un sistema de control global. El análisis de los problemas de dicha estrategia nos remiten al punto (a).

B I B L I O G R A F I A

[1] Bennis, W.G., Benne, K.D., Chin, R., The Planning of Change Holt, Rinehart and Winstan, New York, 1969.

[2] Emery, F.E., Trist, E.L., "Sociotechnical Systems", in Systems Thinking, Baltimore, Penguin Books, 1969.

[3] Emery, F.E., Trist, E.C., Towards a Social Ecology: Contextual Appreciation of the Future in the Present, London, Plenum Press, 1973.

[4] Minsky, M., A Framework for Representing Knowledge, AI Memo 306, MIT Artificial Intelligence Laboratory, Cambridge, Mass. June 1974.

[5] Huysmans, J.H.B.M., The Implementation of OR, John Wiley, 1970.

[6] Churchman, C.W., Schainblatt, A.H., The Researcher and the Manager: A Dialectic of Implementation, Man. Sc., Vol. II, No. 4, [illegible].

[7] Ackoff, R.L., A concept of corparate planning, New York, Wiley Inter science, 1969

[8] Carvajal, R., Interdisciplina: Definición y Aplicaciones (parte I), Comunicaciones Técnicas del IIMAS, Vol. 6 No. 121, 1975.

[9] Kuhn, T.S., The Structure of Scientific Revolutions, The Univ. of Chicago Press, Chicago and London 1962.

[10] Weizenbaum, J., Computer Power and Human Reason, Freeman, San Francisco, 1976

[11] Taylor, R.N., The Influence of Psychological Variables on Implementation of Planning Models, Working Paper 324, Univ. of British Columbia, 1975

[12] Argirjs, CH., MIS: The Challenge to Rationality and Emotionality, Man. Sc. Vol. 17, No. 6, Feb. 1971

[13] Michael, D.N., On Learning to Plan and Planning to Learn, Jossey Bess, San Francisco, 1973

[14] Bean, A.S., Neal, R.D., Radnor, M., Tansik, D.A., "Structural and Behavioral Correlates of Implementations in U.S. Business Organizations", in Implementing OR/MS by Schultz, R.L., Slevin D.D., Elsevier, 1975

[15] Radnor, M., Rubenstein, A.H., Bean, A.S., Integration and Utilization of MS activities in Organizations, OR Quarterly, 19 (1968)

[16] Rubinstein, A.H., Some Organizational Factors Related to the Effectiveness of MS Groups in Industry, Man. Sc., Vol. 13 No. 8, 1967

[17] Neal, R., Radnor, M., The Relation Between Formal Procedures for Pursuing OR/MS activities and OR/MS Group Success, OR, Vol. 21, No. 2, 1973.

[18] Stillson, P., Implementation of Problems in OR, OR, Vol. 11, No. 1, 1963.

[19] Lucas, H.C., Performance and the Use of an Information System, Man. Sc., Vol. 21, No. 8, 1975.

[20] Swanson, B.E., MIS: Appreciation and Involvemente, Man.Sc. Vol. 21, No. 2, 1974.

[21] Chervany, N.L., Dickson, G.W., An experimental evaluation of informating overload in a production environment, Man.Sc., Vol. 20, No. 10, 1974.

[22] Weinberg, G.M., The Psychology of Computer Programming, Van Nostrand Reinhold, 1971.

[23] Dickson, G.W., Senn, J.A., Chervany, N.L., Research in MIS: The Minnessota Experiments, Man.Sc., Vol. 23, No. 9, May 1977

[24] Dariff, M.L., Lusk, E.J., Cognitive and Personality test for the Design of MIS, Man. Sc., Vol. 23, No. 8, 1977.

[25] Ein-Dor, P., Segev, E., Organizational Context and the Success of MIS, Man. Sc., Vol. 24, No. 10, 1978.

[26] Ein-Dor, P., Segev, E., Strategic Planning for MIS, Man.Sc., Vol. 24, No. 15, 1978.

[27] Vazsonyi, A., Why Should the Management Scientist Grapple with Information Systems, Interfaces, Vol. 3, No. 2, Feb. 1973

[28] Stern, N., Is Information Systems Talking to itself, Interfaces, Vol. 2, No. 4, August 1972.

[29] Vazsonyi, A., Data Base Management Systems, Interfaces, Vol. 5, No. 3, May 1975.

[30] Vazsonyi, A., Rational Approach to Irrationality, Interfaces, Vol. 4, No. 3, May 1974.

[31] King, W.R., Cleland, D.I., The Design of MIS: An Information Analysis Approach, Man.Sc., Vol. 22, No. 3, 1975.

[32] Mason, R.O., Mitroff, I.I., A Program for Research on MIS, Man. Sc., Vol. 18, No. 5, 1973.

[33] Ackoff, R.L., Management Misinformation Systems, Man.Sc., Vol. 14, No. 4, 1967.

[34] Argyris, Ch., Schon, D.A., Theory in Practice: Increasing Professional Effectiveness, Jossey Bass, San Francisco, 1974

[35] Ackoff, R.L., Redesigning the Future, Wiley-Interscience, New-York-London, 1974

[36] Sagasti, F.R., Mitroff, I.I., Operations Research from the Viewpoint of General System Theory; Omega, Vol. 1, No. 6, 1973.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

APLICACION DE LA CIENCIA DE LOS SISTEMAS A LA ESTRUCTURACION DE PROBLEMAS DE PLANEACION

DR. FELIPE OCHOA ROSSO

NOVIEMBRE, 1980

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

APLICACION DE LA CIENCIA DE LOS SISTEMAS A LA ESTRUCTURACION DE PROBLEMAS DE PLANEACION

Felipe Ochoa[1]

El objeto de este ensayo es buscar la estructura fundamental del proceso de planeación del desarrollo, a cualquier nivel de agregación, identificando los principios básicos del proceso, con el apoyo que ofrece la ciencia de los sistemas.

Al razonar sobre la necesidad de encauzar el desarrollo mediante la planeación y de mostrar la complejidad del proceso de desarrollo mismo, debido fundamentalmente al alto grado de interrelación de sus componentes y a los diversos niveles de agregación de la planeación, se concluye sobre la conveniencia de planear mediante el enfoque de sistemas y la utilización del método científico como herramienta de realización de planes.

Después de establecer brevemente los fundamentos de la Ciencia de los Sistemas y su procedimiento metodológico, se propone un esquema de estructura conceptual para la solución de problemas de planeación, basado en la búsqueda de conceptos básicos, mediante un proceso inductivo, y se señalan igualmente algunos lineamientos para el proceso efectivo de planeación en México.

---

1 Coordinador de la Especialidad de Ingeniería de Sistemas, Academia de Ingeniería.

I

DESARROLLO Y SU PLANEACION

1.1 NATURALEZA DEL DESARROLLO

El nivel de bienestar de los hombres que conforman a un país es dinámico, partiendo de un estado inicial que cambia, para bien o para mal, en los diversos intervalos del horizonte de tiempo.

Este nivel de bienestar es la resultante del grado con el que el individuo logra satisfacer sus necesidades físico-biológicas, intelectuales y recreacionales, mediante la adquisición y uso de satisfactores diversos como son la vivienda, la alimentación, los servicios básicos y de esparcimiento, adquiridos con el ingreso derivado de su empleo y del nivel de ahorro derivado de excedentes de períodos anteriores.

Definiremos como *estado de desarrollo de un individuo* a su nivel de bienestar o calidad de vida en un tiempo dado t, el cual estará representado por un *perfil de desarrollo* como el mostrado en la Fig. 1. Este perfil representa gráficamente a un conjunto de indicadores que cuantifican a las principales componentes descriptivas del nivel de bienestar, como pueden ser su ingreso, nivel de ahorro, educación y grado de motivación social, entre otros.

De manera extensiva, el *estado de desarrollo de un país* lo entenderemos como el nivel de bienestar de la totalidad de sus habitantes en el mismo tiempo t. Para efectos de integrar la variabilidad de estos niveles de bienestar, se adoptará como indicador del estado de desarrollo de un país al perfil de desarrollo de la Fig. 2. En este caso, cada indicador particular quedará representado por un *valor medio* y una *medida de la dispersión*, que con respecto al anterior, presenta la población dada.

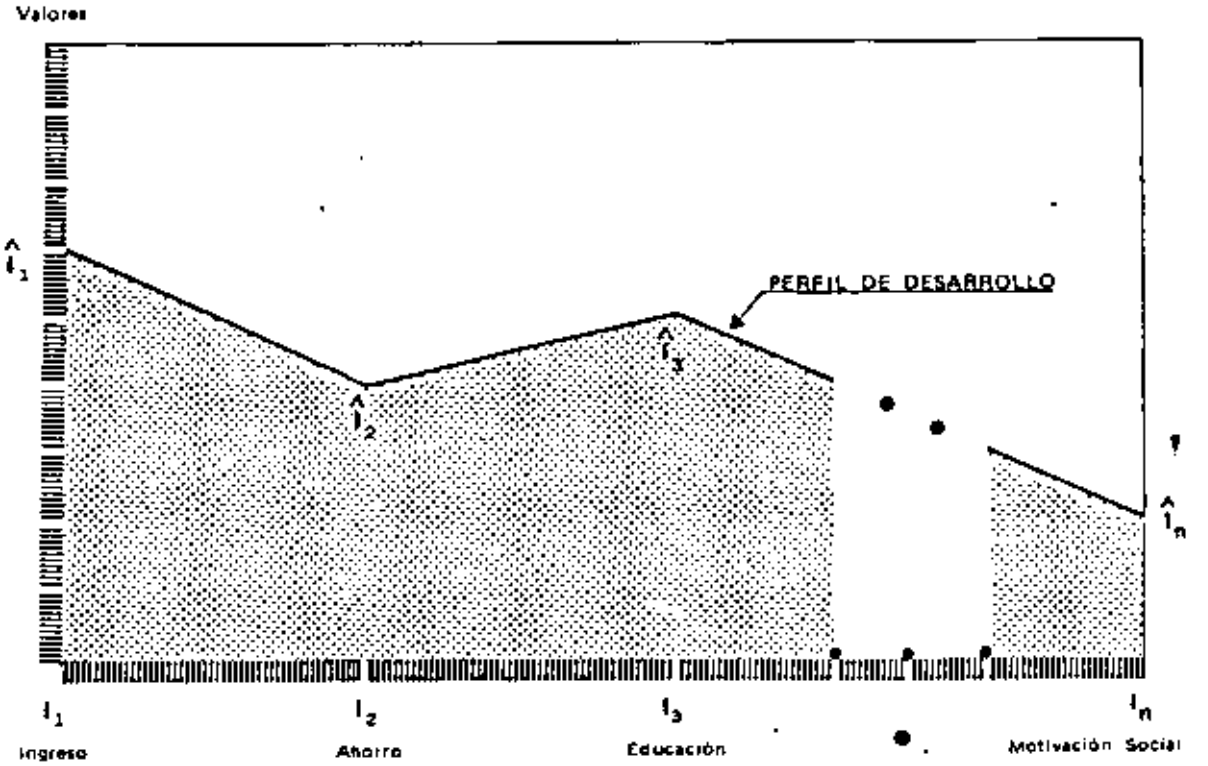


FIG. 1 PERFILES DE DESARROLLO INDIVIDUAL EN EL TIEMPO t.

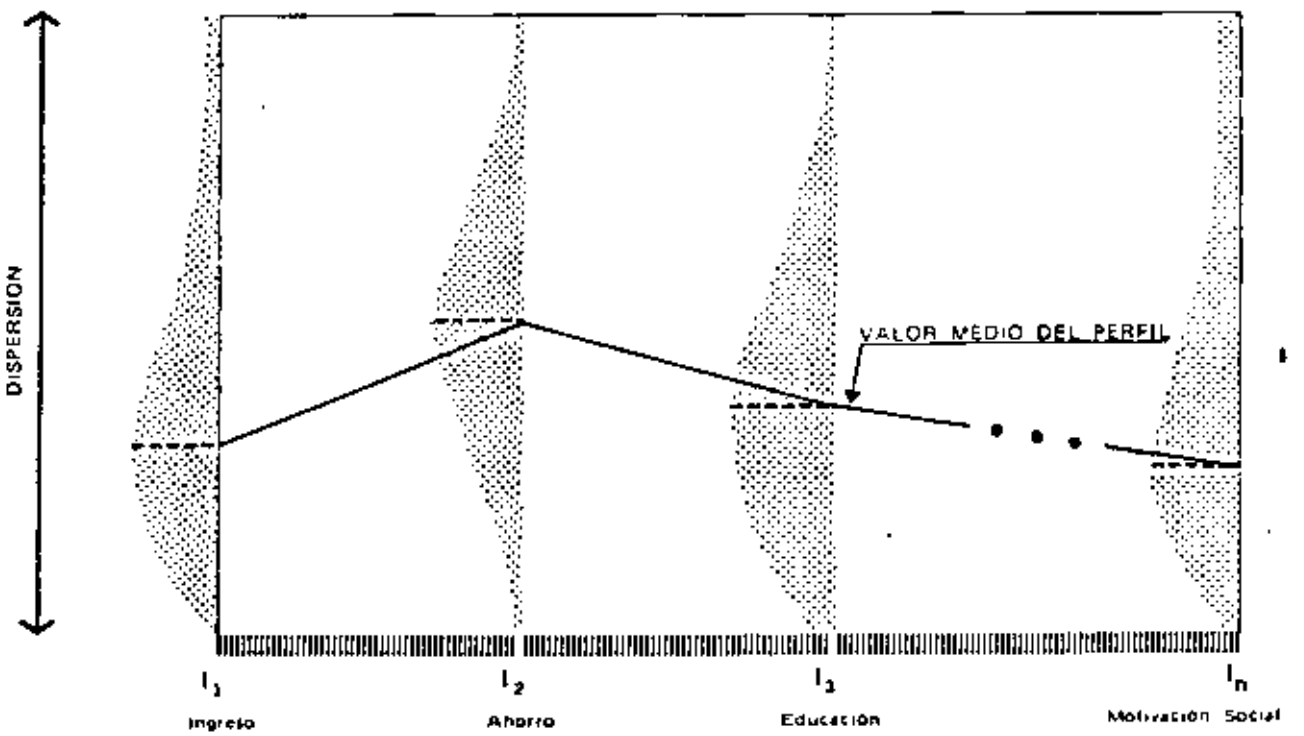


FIG. 2 PERFIL DE DESARROLLO DEL PAIS EN EL TIEMPO t.

Continuando con las definiciones, entenderemos como *potencial de desarrollo individual*, a la capacidad de cada persona de mejorar su nivel de bienestar y el de los demás, durante el siguiente intervalo de tiempo y por tanto, de cambiar su perfil de desarrollo en t+1, con respecto al registrado en t.

Análogamente, el *potencial de desarrollo del país*, será el agregado del potencial individual, medido por la capacidad de incrementar en términos absolutos la media del perfil del país, así como de disminuir la dispersión porcentual con respecto a él.

El establecer la distinción anterior entre "estado de desarrollo" y "potencial de desarrollo" nos permite eslabonar por etapas al proceso. De esta forma el estado de desarrollo en t, más el desarrollo mismo logrado en el intervalo [t, t+1], (función éste del potencial de desarrollo en t), nos genera el estado de desarrollo en t+1.

El esquema anterior difiere sin embargo de otras conceptualizaciones, como por ejemplo la de Ackoff [1], para quien desarrollo no es un estado, sino "una capacidad definida por aquello que (los individuos) pueden hacer con lo que tienen, para mejorar su calidad de vida y la de los demás".

Continuando bajo nuestro esquema, en el proceso de desarrollo de los países a través del tiempo es de esperarse un mayor bienestar compartido, observable cuando el perfil de desarrollo crece en sus valores medios y disminuye sustancialmente su dispersión, correspondiendo a una mejor distribución de la calidad de vida entre los individuos de la misma generación y de las generaciones subsecuentes.

Sin embargo, aun cuando el fenómeno anterior es comprobable en los países desarrollados, bajos los postulados de la escuela económica neoclásica, que sostiene que el propio proceso de desarrollo tiende a generar correctores endógenos que reducen la desigualdad, no lo es para los países en desarrollo.

En efecto, como observa Ifigenia Navarrete [6], "los correctores económicos endógenos que deberían *abaratar* el capital al acumularse éste, y *encarecer* la mano de obra al alcanzarse la ocupación plena, permitiendo mejorar la distribución, han resultado sustancialmente inoperantes, puesto que solo el trabajo especializado o altamente calificado se retribuye a un nivel relativamente elevado".

De lo anterior, es válido preguntarse en qué forma podría encauzarse el desarrollo, para que con el auxilio de mecanismos *exógenos* de política económica, pudiera lograrse una mejor distribución del ingreso per cápita.

1.2 ENCAUZAMIENTO DEL DESARROLLO

Un mejoramiento del estado de desarrollo del individuo en t + 1 depende desde luego del *estado de desarrollo* en t y de su *potencial* para el periodo [t, t + 1]. Este último corresponde a la capacidad para mejorar su nivel de vida; esto es, de su motivación y habilidad para lograr el desarrollo, así como a las *oportunidades* de empleo y educación que estén a su alcance.

Cuando hablamos del mejoramiento del estado de desarrollo de los países, la velocidad de cambio de los perfiles correspondientes dependerá del grado de desarrollo actual, alcanzado a través del esfuerzo acumulado de generaciones anteriores, de los recursos de todo tipo disponibles y la forma de asignarlos a las actividades productivas, así como de los obstáculos culturales que restringen la posibilidad de mejoramiento.

Es aquí donde se observa la conveniencia de encauzar las acciones para lograr los cambios de perfil deseados. Se presentan diferentes opciones de perfiles de desarrollo futuro que pueden ir desde el deseo deliberado de incrementar la media del bienestar con la misma dispersión, la opción de incrementar la media cerrando también la dispersión asociada con la distribución del bienestar y las

demás combinaciones intermedías. Es este proceso de encauzamiento o planeación del desarrollo el que juzgamos impostergable, principalmente en los países en desarrollo, cuando observamos que el solo juego de los factores endógenos de la actividad económica han dado como resultado perfiles de desarrollo en donde solo se logra incrementar la media del bienestar, sin mejorar su distribución y en donde la tendencia no permite identificar para el futuro situaciones distintas a las ya experimentadas.

1.3 EL PROCESO DE PLANEACION

Por planeación del desarrollo entendemos el proceso permanente de previsión, coordinación y encauzamiento de las medidas y acciones concertadas por la sociedad, que se requieren para el aprovechamiento efectivo de los recursos humanos, materiales y tecnológicos del país, con el fin de lograr un desarrollo continuo y permanente, cuyos resultados produzcan un perfil de mayor bienestar social, distribuído más equitativamente entre todos los sectores de la población y regiones del país [7].

La planeación del desarrollo puede asociarse a distintos niveles de agregación, partiendo del individuo, pasando por las empresas productoras de bienes y servicios, los sectores de actividad económica y el país en su totalidad, correspondiendo éste al mayor nivel de agregación. Asimismo, asociando la dimensión territorial a la planeación, ésta podrá llevarse al nivel de un asentamiento humano, a una región o a la totalidad del territorio (ver sección 3.2 para mayor detalle).

Es claro el nivel de complejidad de la planeación del desarrollo a medida que avanzamos en ese esquema de agregación. Esta complejidad es aún mayor cuando consideramos la estrecha interrelación de la actividad económica entre regiones y entre sectores. Lo anterior invita a cuestionar primeramente la factibilidad de realizar la planeación efectiva a altos niveles de agregación y por lo tanto a lograr el encauzamiento del desarrollo.

A continuación, el siguiente cuestionamiento es sobre quién debe realizarla. En este sentido, Ackoff considera que la planeación para el desarrollo efectivo no pueden hacerla algunos para los demás, sino que cada quien debe hacerla, pero pueden ser auxiliados por planeadores profesionales, [1].

Nosotros coincidimos con la posición anterior cuando se trata de la planeación desagregada al nivel de desarrollo individual o de pequeñas comunidades en el extremo de la curva de distribución del ingreso y las oportunidades.

Sin embargo, al hablar de planeación a mayores niveles de agregación sectorial o territorial, disentimos de Ackoff y pensamos que si bien la planeación debe ser realmente participativa para lograr efectividad, esta debe integrarse y realizarse por grupos de planeación profesionales, como lo ha hecho por ejemplo Francia, en el transcurso de sus siete planes iniciados por Massé [4] en 1946.

Con respecto al primer cuestionamiento, consideramos que para mayores niveles de agregación, la complejidad del proceso de desarrollo y la gran interacción de sus componentes requiere, para que la planeación logre resultados al aplicarse, que ésta conceptualice en forma integral al país, identificando sus elementos componentes y su entorno, de tal forma que sea posible estructurar razonablemente el proceso de planeación. Asimismo, la planeación de dicha estructura integral, debe ser el resultado de un proceso analítico-sintético que permita establecer mediante la formación de conceptos creativos, cuál perfil de desarrollo buscar en base a los objetivos generales y cómo lograrlo. Desde luego que dicha planeación deberá ser igualmente pragmática, teniendo en cuenta los serios obstáculos del desarrollo para buscar la forma de removerlos, así como el potencial para señalar los mecanismos que lo liberen para materializarlo.

Sostenemos que los requerimientos señalados para lograr una planeación efectiva a diferentes niveles de agregación; esto es, la estructuración conceptual del país y sus interacciones, y el proceso analítico-sintético que permita derivar el plan, los ofrece el campo del conocimiento conocido como Ciencia de los Sistemas, lo cual trataremos de mostrar más adelante, después de señalar los aspectos relevantes de dicho campo.

II

LA CIENCIA DE LOS SISTEMAS

En la actualidad, un cuarto de siglo después de la institucionalización formal de las agrupaciones profesionales de Investigación de Operaciones y el Instituto de Ciencias Administrativas en Norteamérica, es ampliamente conocido el tipo de problemas y las herramientas metodológicas que, bajo diversos nombres, se han desarrollado para el tratamiento de sistemas complejos.

El tema central de estas disciplinas se refiere a los *sistemas*, que para efectos nuestros definiremos con Hall [2] como: *un conjunto de objetos con interrelaciones, tanto entre los objetos como entre sus atributos*. Asimismo se establece que los atributos son propiedades de los objetos.

El siguiente concepto fundamental es el de *entorno*. Se dice que para un sistema dado, su entorno es el conjunto de objetos fuera del sistema tales que, al cambiar sus atributos afectan al sistema y también que dichos atributos pueden modificarse con el comportamiento del sistema.

Por la generalidad de los conceptos anteriores, se intuye la necesidad y conveniencia de clasificar a los sistemas, para lo cual se han hecho considerables esfuerzos en el pasado. Para nuestra exposición consideramos la dicotomía siguiente: *sistemas de la naturaleza*, cuya descripción y estudio es campo de las ciencias físicas y sociales y los *sistemas desarrollados por el hombre*, (sean *físicos*, como un sistema de transporte o *abstractos*, como un sistema económico o administrativo), hacia los cuales se dedicarán las discusiones subsecuentes.

Los problemas asociados con los sistemas pueden clasificarse, relacionándolos con: la operación de un sistema existente, la expansión o contracción del sistema, o bien la creación de un sistema nuevo.

Históricamente, el conjunto de problemas operacionales de sistemas existentes, relacionados con la investigación de la operación óptima de los mismos, se adoptó como campo principal de la denominada Investigación de Operaciones. Su inicio se remonta a la investigación y recomendación de estrategias para operaciones navales durante la segunda guerra mundial; sin embargo, su aplicación se ha generalizado internacionalmente a la operación de sistemas complejos provenientes de toda la gama de la actividad económica.

En las aplicaciones contemporáneas se observa un gran campo para los países en desarrollo en donde, como observa Morse [4], uno de los iniciadores de esta área del conocimiento, los sistemas operacionales son usualmente menos complejos que los de los países más desarrollados y adicionalmente los beneficios potenciales son mayores.

Por otra parte, la naturaleza del problema de la expansión de un sistema existente o la creación de un nuevo sistema implican la necesidad de planear su desarrollo. La solución de este tipo de problemas ha sido el campo principal de la denominada Ingeniería de Sistemas, iniciada también a fines de la década de los cuarenta en los Estados Unidos por grupos de investigación de empresas industriales, principalmente del sector telecomunicaciones.

Independientemente de las diferencias indicadas, existe una aceptación generalizada en el sentido de que son más los elementos de coincidencia que de discrepancia entre la Investigación de Operaciones y la Ingeniería de Sistemas, al punto de que se ha sugerido agrupar el tratamiento científico de problemas de sistemas bajo el nombre de *Ciencia de los Sistemas* [2]. En efecto, por una parte, ambas disciplinas aplican el denominado *enfoque de sistemas*, en contraposición con el enfoque de componentes, a la solución de problemas complejos. Este enfoque de sistemas se refiere tanto al análisis detallado de los problemas, identificando sus componentes principales y relevantes así como las interacciones entre estas y, de éstas con su entorno; como a buscar el equilibrio o mejoramiento del sistema en su totalidad, sin afectar su funcionamiento integral, al momento de sintetizar soluciones.

Por otra parte, la metodología empleada en la solución de problemas de sistemas, tanto por la Investigación de Operaciones como por la Ingeniería de Sistemas es el procedimiento analítico-sintético usual en el *método científico;* y en el proceso mismo de solución es comun en ambas disciplinas el desarrollo de "modelos", principalmente analíticos, que permiten conocer con detalle el funcionamiento de los sistemas y los cambios que experimentarían bajo diferentes modificaciones en sus componentes o en sus interrelaciones. Los anteriores argumentos comprueban ampliamente la tésis de una mayor coincidencia de ambas disciplinas.

Volviendo a nuestro tema central: el desarrollo y su planeación a diferentes niveles de agregación, es evidente que la Ciencia de los Sistemas satisface ampliamente los requisitos estipulados en la sección anterior, para la planeación efectiva del desarrollo.

En efecto, la planeación corporativa, sectorial o territorial, es en si un problema de expansión de sistemas existentes, los constituídos por la empresa, el sector o la región por planear. Estos sistemas son complejos, al estar constituídos por una variedad de componentes con alto grado de interrelación y de relación con sus entornos, por lo que la planeación de su desarrollo debe realizarse bajo el enfoque de sistemas.

Por otra parte, el proceso analítico-sintético necesario para elaborar un plan, requerimiento establecido para la planeación en los distintos niveles de agregación, lo ofrece también la Ciencia de los Sistemas.

De acuerdo con ello, en las secciones subsecuentes se propone el esquema de estructura conceptual para realizar la planeación bajo el enfoque propuesto de la Ciencia de los Sistemas.

III

ESTRUCTURA DE LA PLANEACION

3.1 EXISTENCIA DE LA ESTRUCTURA

Al plantear el problema de planeación bajo el enfoque de sistemas y al resolverlo con la metodología científica, nuestra experiencia en su realización e implantación para distintas empresas, diferentes sectores y variados horizontes, permite visualizar el surgimiento de una cierta estructura. Los principios básicos de esta estructura son aplicables con toda generalidad y es necesario percibirlos y reconocerlos con el objeto de facilitar la aplicación de la planeación con el cúmulo de la experiencia adquirida como país y permitiendo identificar formas para el mejor uso de recursos humanos escasos, dedicados a este quehacer en países de menor desarrollo.

La identificación de esta estructura emana no solo del estudio amplio y de la aplicación del método científico a los problemas de planeación específica, sino también al esfuerzo de síntesis que es necesario aplicar al proceso de planeación *per se*, en abstracto.

Koopman [3] reconoce la importancia, dentro del proceso de aplicación del método científico: observación experimental; razonamiento deductivo y formación conceptual, de esta última fase, como la forma especial de intuición que percibe el "orden", la "unidad" y la "armonía" y que conduce inductivamente a principios generales.

En las siguientes secciones se propondrán ciertos principios generales, resultado de ese esfuerzo sintético, del proceso en sus diferentes fases, los cuales como se podrá observar, constituyen un procedimiento general para la realización de la planeación.

3.2 ESQUEMA DE DESAGREGACION

Para enmarcar los principios generales conviene referirse a un esquema gráfico que muestre las dimensiones sectorial y territorial de la planeación, definidas en la Sección 1.3; asi como los distintos niveles de desagregación de la planeación. Bajo el esquema representativo seleccionado (Fig. 3), el plan nacional de desarrollo quedaría representado por la totalidad del "cilindro", en donde objetivos, metas y estrategias serían globales, para la totalidad del territorio y de la actividad económica.

El procedimiento de desagregación del plan global, para efectos de hacerlo operativo, puede llevarse a cabo desagregando o partiendo con respecto a: la dimensión sectorial, la dimensión territorial o ambas dimensiones simultáneamente.

Al proceder a la desagregación sectorial, los "prismas" resultantes representarían planes nacionales (para la totalidad del territorio) de cada sector de la economía. Al continuar la partición en subprismas, resultarían los planes nacionales de subsectores económicos y asi sucesivamente hasta llegar a la menor unidad indivisible para este efecto, que es la empresa.

Un proceso análogo aplicado a la dimensión territorial generaría en primer términos "prismas" de base circular para cada región, representando al plan de la totalidad de la actividad económica para la región dada del territorio. La partición subsecuente de cada prisma generaría los planes globales de desarrollo de unidades territoriales de menor envergadura cada vez, hasta llegar al asentamiento humano o a una zona específica de éste.

Por último, al desagregar simultáneamente bajo ambas dimensiones tendríamos el plan del sector i-ésimo en la región j-ésima, lo que equivale a la "rebanada" correspondiente del prisma regional. El proceso de partición al continuar, generaría planes subsectoriales de una subregión, terminando en el plan de una empresa del sector inicial, para una localidad dada de la región.

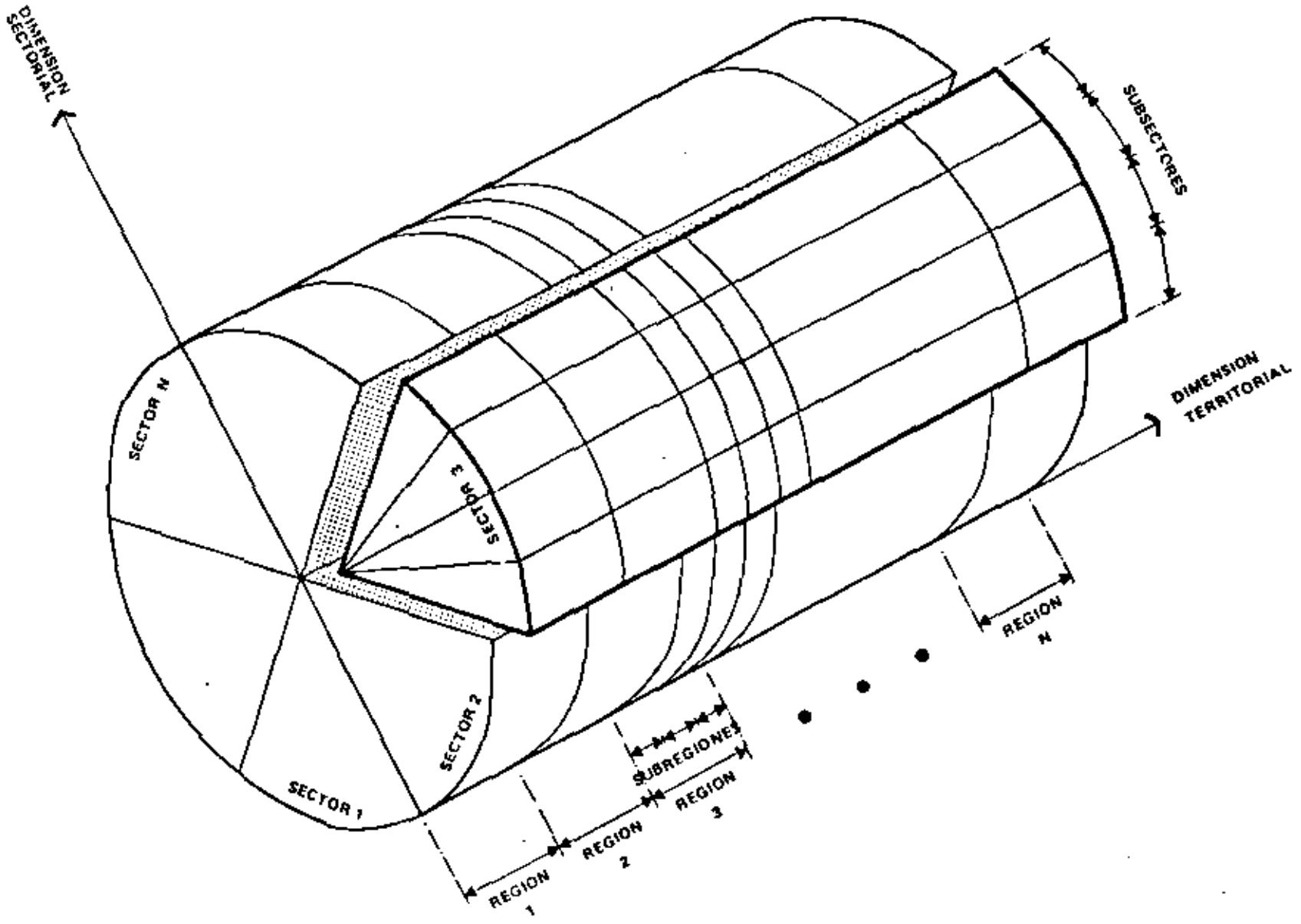


FIG. 3 ESQUEMA DE CLASIFICACION DE LA PLANEACION

3.3 PRINCIPIOS GENERALES

El conjunto de principios generales o invariantes de la planeación que hemos identificado, de ninguna manera es exhaustivo. Sin embargo, proporciona elementos útiles en la búsqueda de un esquema efectivo de planeación. Estos son los siguientes:

a. El proceso constituído por el conjunto de fases ligadas entre sí, que nos permiten estructurar racionalmente los objetivos, metas, políticas y estrategias integrantes de un plan, es conceptualmente el mismo, idependientemente del grado de desagregación sectorial o territorial de la entidad cuya planeación habrá de llevarse a efecto.

b. El conjunto de instrumentos metodológicos necesarios para la ejecución de esas distintas fases de la planeación, principalmente las de pronóstico de necesidades y oportunidades futuras, de generación de opciones alternativas de desarrollo y de evaluación *ex ante* de estrategias para decisión, y *ex post* de consecuencias para control, están disponibles y han sido desarrollados por la Ciencia de los Sistemas.

c. Para los países en desarrollo la información de partida con frecuencia es incompleta y no con un alto grado de confianza, lo que obliga al empleo constante de "razonamientos aproximados" y permite intuir la conveniencia de elaborar y utilizar una metodología de planeación más cercana a la realidad del sujeto de la planeación.

d. Los elementos que componen a los sistemas por planear: empresa, subsector o sector y país, son descriptivamente los mismos, independientemente del grado de desagregación sectorial o territorial.

e. Para un mismo nivel de desagregación sectorial, independientemente del sector económico bajo estudio, el tipo de información requerida sobre el sistema y sobre el entorno, para efectos de análisis y diagnóstico es el mismo.

f. La uniformidad de la planeación que se observa en los principios anteriores permite concluir sobre la posibilidad de que los países desarrollen expertos "generalistas" que puedan conducir eficientemente a grupos de trabajo en los quehaceres de la planeación, independientemente del sector o espacio que se planee.

3.4 GENERALIDAD DEL PROCESO DE PLANEACION

La experiencia derivada de casos de planeación en este y otros países nos señala que el proceso de realización obedece a una serie de pasos o fases de aplicación general, independientemente de que se trate de la planeación del país, de un sector o de una empresa y en cualquier ámbito espacial. Aun cuando la terminología cambia entre distintos autores, asi como la secuencia de algunas fases, puede considerarse en términos generales que el proceso concuerda con el mostrado en la Fig. 4.

En ella destacan por una parte la linealidad del proceso y su flujo de retroalimentación, reflejando asi su carácter dinámico y permanente y por otra, la interacción con la comunidad y otros organismos encargados de los variados aspectos de la planeación, a lo largo del proceso.

3.5 HERRAMIENTAS DE LA PLANEACION

En relación con los instrumentos metodológicos específicos empleados para la ejecución de las distintas fases del proceso indicado, en especial las de pronóstico de requerimientos, de integración de estrategias alternativas y de evaluación *ex ante* y *ex post* de impactos potenciales y reales respectivamente, en general se emplean las herramientas avanzadas de la Investigación de Operaciones y de la Ingeniería de Sistemas.

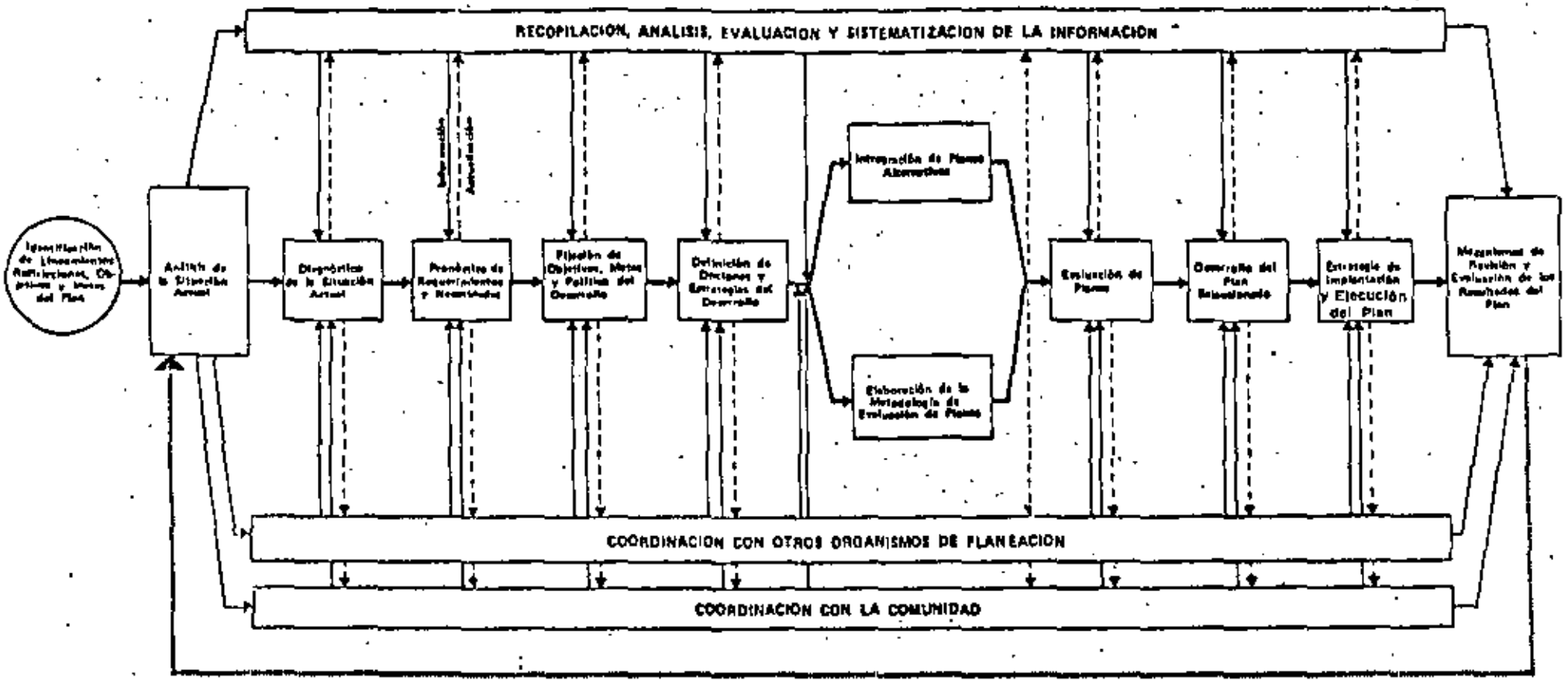


FIG. 4 DIAGRAMA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE PLANEACION

Los métodos y algoritmos empleados de optimización y evaluación invitan a cuestionar si para países en desarrollo la aplicación directa de estos métodos es la más conveniente, sobre todo si se tiene en cuenta que desde la fase de análisis y diagnóstico, la cantidad y confiabilidad de la información disponible es limitada.

En este contexto y sin base experimental aún, se considera conveniente explorar lo que la intuición nos señala, en el sentido de formalizar el proceso de "razonamientos aproximados" que tenemos que adoptar frecuentemente con el auxilio quizá de la denominada "teoría de conjuntos difusos" desarrollada por Zadeh [8] a principios de la década de los sesenta y que utiliza conceptos y propiedades de conjuntos borrosos no bien definidos.

3.6 COMPONENTES DEL SISTEMA A PLANEAR

Como se puede observar a continuación, las componentes principales que forman el sistema que debe planearse son las mismas si se trata de un nivel agregado o del país, o bien de niveles desagregados como el sectorial o corporativo.

En efecto, al hablar del nivel de máxima agregación, y considerando al país como un sistema, se observa que sus componentes principales son las siguientes:

1. ESPACIO
   Constituído por un territorio o suelo, el subsuelo, el espacio aéreo y su mar patrimonial, en donde cada una de sus componentes presenta atributos como pueden ser morfológicos y de climatología, entre otros, así como situacionales.

2. RECURSOS NATURALES

Que usualmente se clasifican, atendiendo a su naturaleza perecedera, en renovables como son entre otros los forestales, pesqueros e hidráulicos o no-renovables como los mineros y petroleros.

3. RECURSOS HUMANOS

Constituídos por su población con características de distribución geográfica, grado de bienestar, de necesidades insatisfechas, de potencial de desarrollo y de acceso a oportunidades de empleo y de educación.

4. ORGANIZACION

Que orienta y controla las actividades de todo tipo de la población.

5. ACERVO DE CAPITAL

Formado por las instalaciones creadas en el pasado por los habitantes, utilizando el espacio y los recursos naturales existentes.

6. MECANISMO PRODUCTIVO

Diseñado para la producción de los bienes y servicios que permitan satisfacer las necesidades de la población, respondiendo a las preguntas de qué y cuánto producir, para quién, cuándo y en qué sitio producir. La actividad económica se genera entonces cuando el mecanismo productivo hace uso de los diferentes elementos que constituyen al país visto como sistema, de acuerdo con ciertas normas políticas y económicas, para satisfacer en determinada forma las necesidades de todo tipo de la población, derivándose de ello un cierto estado de desarrollo.

Al desagregar la planeación por sectores o por regiones, el espacio, los

recursos naturales y humanos empleados, la organización, acervo de capital y mecanismo productivo siguen siendo los elementos componentes del sujeto de la planeación, aun cuando cuantitativa y cualitativamente varíen según el nivel considerado.

Lo anterior debiera facilitar por una parte la recolección, archivo y localización de la información necesaria para planear, a cualquier nivel, teniendo en cuenta que los elementos del sistema son similares.

3.7 INFORMACION REQUERIDA PARA EL ANALISIS Y DIAGNOSTICO

El sistema que permite la actividad económica de un país lo constituyen las unidades de producción denominadas empresas, que a su vez producen bienes intermedios o bienes de consumo final, conforme a la división usual de la producción.

La totalidad del sistema productivo puede desagregarse primeramente en los sectores primario, secundario y terciario, los cuales a su vez pueden partirse en subsectores y áreas de actividad económica, hasta llegar a la mínima unidad formada por la empresa (Fig. 5).

Al aplicar el método científico al proceso de planeación, la fase de análisis o de observación experimental implica el conocimiento detallado del sujeto de la planeación, con la finalidad de diagnosticar su estado actual de desarrollo, sus obstáculos y su potencial de desarrollo futuro.

Para esta primera fase de planeación es posible derivar un aspecto general consistente en que, para un nivel dado de agregación, existe una estructura básica de la información necesaria para realizar el análisis, independiente del sector económico de que se trate.

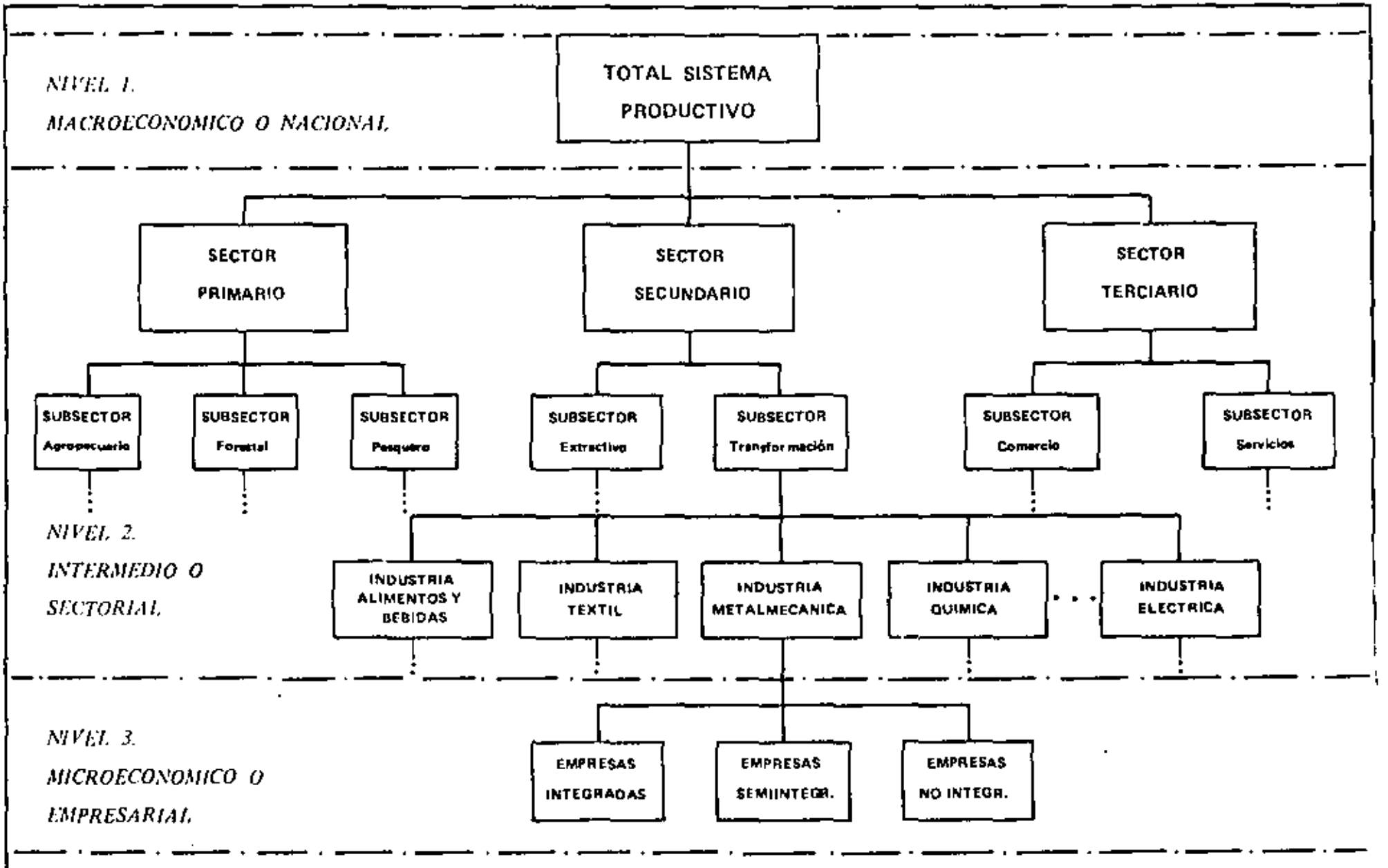


FIG. 5 ESQUEMA DE DESAGREGACION SECTORIAL DEL SISTEMA PRODUCTIVO

De esta manera, si la planeación es para el nivel corporativo, indistintamente de los bienes o servicios que produzca, o del sector a que pertenezca, la información requerida para las fases de análisis y diagnóstico es similar en términos genéricos. Es necesario conocer las características del mecanismo de adquisición de insumos, del procedimiento de producción, de la comercialización y del mercado; asimismo será necesario conocer con detalle los sistemas de apoyo administrativo y financiero de la empresa.

Si la planeación se ejecuta para un nivel intermedio sectorial o de un grupo de empresas, la información será agregada y quizá no con un alto grado de confiablidad y las estrategias de desarrollo probablemnte no lleguen a tener el grado de detalle que tendrían para una empresa en particular. La información requerida para este nivel de planeación se refiere a las caracteríticas globales del "sector oferta" en estudio, asi como de su "sector demandante" de bienes y servicios; la problemática a identificar no será casuística, sino por el contrario, la que afecta a la mayoría del sector, siendo el proceso semejante para cualquier grupo de empresas.

Para el nivel de mayor agregación, la información requerida es la de la totalidad de la actividad económica, por lo que se utilizarán los principales indicadores macroeconómicos para efectos de análisis y diagnóstico.

3.8 RECURSOS HUMANOS PARA LA PLANEACION

Finalmente observamos que si los técnicos en planeación son escasos en los países desarrollados, tanto más lo serán en los países en desarrollo. Lo anterior desde luego invita a una mejor utilización de la capacidad instalada y de la experiencia acumulada en esta materia.

Dada la uniformidad y estructura del proceso de planeación que se observa en los principios anteriores, se considera plausible que los países en desarrollo

preparen expertos generalistas que puedan conducir con efectividad a los grupos de trabajo complementarios, formados por expertos en el sector y territorio del tema por planear.

Para ilustrar objetivamente la combinación de expertos generalistas con especialistas en los campos requeridos, integrando los denominados "grupos interdisciplinarios" para realizar la planeación, ofrecemos el concepto de "perfil de experiencia-conocimiento" que hemos elaborado en la Fig. 6 para este propósito.

Para ello, consideremos a cualquier profesional de la planeación, quien a través del estudio y la investigación, así como de su trabajo profesional, adquiere conocimientos sobre el proceso de planeación a diferentes niveles, sobre las herramientas metodológicas disponibles y sobre las áreas específicas susceptibles de planeación, entre otras cosas. Si representamos estos conocimientos en la forma estructurada de casilleros de la Fig. 6, dividida en las tres secciones indicadas y si para cada columna se desglosan con más detalle los conocimientos disponibles, puede trazarse un perfil que denominaremos de "experiencia-conocimiento" del profesional, que cuánto más bajo en todas sus columnas empieza a definir el perfil del experto generalista. La profundidad del conocimiento referido a cada casillero se representa en la tercera dimensión de la misma figura.

Por tanto, el experto generalista como lo entendemos, es la persona con un perfil de experiencia-conocimiento amplio y con profundidad en los casilleros de "herramientas metodológicas" y de "tipos de problemas" y cuando menos amplios en el conocimiento de diferentes áreas de aplicación de la planeación.

Es claro que cada trabajo de planeación tendrá su propio perfil de experiencia-conocimiento requerido para llevarlo a cabo, el cual tendrá que satisfacerse a base de complementar el perfil del generalista disponible, con los perfiles de otros especialistas, integrando así el grupo interdisciplinario de planeación.

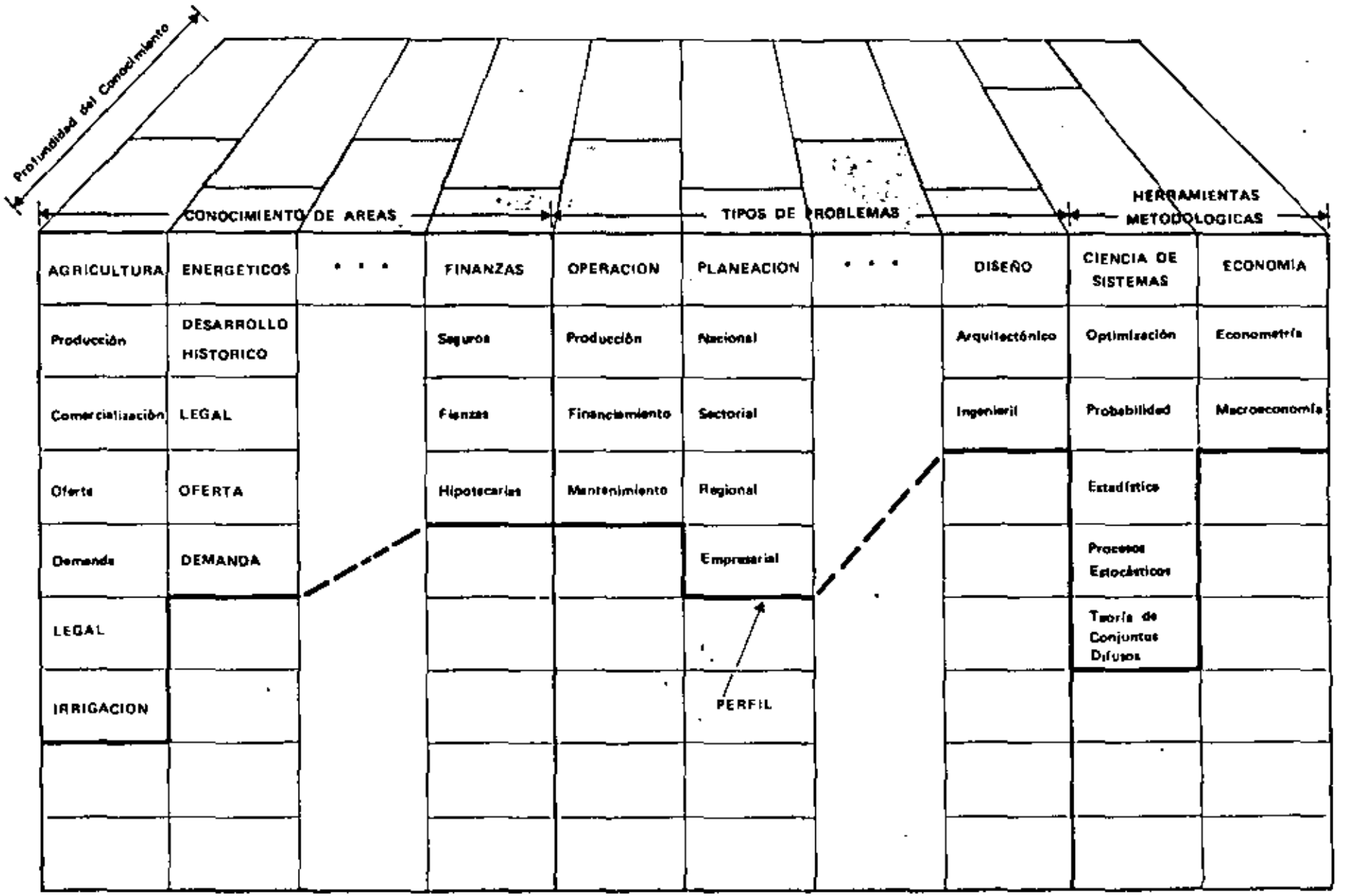


FIG. 6 PERFIL DE EXPERIENCIA-CONOCIMIENTO DEL EXPERTO

Se considera conveniente por tanto, para los países en desarrollo, el implementar una política de preparación de expertos generalistas, que puedan auxiliar eficientemente en los esfuerzos de planeación relacionados con distintos sectores y regiones del país.

3.9 CONCLUSION

Hemos establecido la conveniencia de impulsar el desarrollo mediante la planeación a todos los niveles de agregación de la actividad económica, auxiliándonos para ello de la metodología de la Ciencia de los Sistemas.

Al observar la estructura conceptual del proceso de planeación, ha sido posible distinguir un conjunto de principios generales, cuyo reconocimiento permite generar economías de escala, facilita a su vez el proceso de planeación para países en desarrollo y sugiere un mecanismo de preparación de recursos humanos congruente con la escasez de éstos en dichos países.

REFERENCIAS

[1] Ackoff, R.L., *National Development Planning Revisited*, J. Opns. Res. Soc. Am. 25, 207-218, 1977.

[2] Hall, A.D., *A Methodology for Systems Engineering*, D. Van Nostrand, Co., 1962.

[3] Koopman, B.O., *Intuition in Mathematical Operations Research*, J. Opns. Res. Soc. Am., 25, 189-206, 1977.

[4] Massé, P., *El Plan o el Antiazar*, Editorial Labor, 1968.

[5] Morse, P.M., *ORSA Twenty-Five Years Later*, J. Opns. Res. Soc. Am., 25, 186-188, 1977.

[6] Navarrete, I, M. de., *La Distribución del Ingreso en México, Tendencias y Perspectivas*, en El Perfil de México en 1980, Vol. I, Siglo XXI Editores, 1970.

[7] Ochoa, F., *Metodología de la Ingeniería de Sistemas en la Integración de un Plan Maestro de Desarrollo Nacional*, II Congreso Interamericano de Sistemas e Informática, México, D.F., Nov. 1974.

[8] Zadeh, L.A. *et al*, *Fuzzy Sets and Their Applications to Cognotive and Decision Processes*, Academic Press, Inc., 1975.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

PROGRAMACION LINEAL

DR. SERGIO FUENTES MAYA

NOVIEMBRE, 1980

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

FACULTAD DE INGENIERIA

CENTRO DE EDUCACION CONTINUA

PROGRAMACION LINEAL

SERGIO FUENTES MAYA

NOVIEMBRE 1980

CONTENIDO

1. Introduccion

La programación lineal es la parte de la programación matemática más popular y ampliamente desarrollada. Su aplicación a problemas reales como a diversas ramas de la ciencia tiene como propósito resolver problemas de asignación de recursos escasos. El auge de la programación lineal se debe en gran parte a su facilidad para plantear y resolver problemas reales ó una simplificación de los mismos, así como a la sencillez que existe para la interpretación de sus resultados. Una ventaja importante de la programación lineal es que dispone de métodos especiales para el análisis de un mismo problema cuando existen cambios en los datos. Esto permite establecer cotas sobre los resultados de un problema lineal cuando la información sobre algunos de sus parámetros es incierta o bien varía en intervalos definidos. Para ello, en los últimos veinte años se han desarrollado las técnicas de análisis postóptimo y de parametrización que permiten determinar los efectos de cambios en los datos.

En la práctica también son importantes los métodos de solución de la programación lineal, pues aún problemas pequeños involucran una gran cantidad de operaciones que hacen indispensable el uso de las computadoras. Es por ello que se han desarrollado "paquetes comerciales" eficientes y sofisticados que inclusive permiten la solución de problemas de gran escala. La importancia de estos paquetes no sólo está en el hecho de que resuelve el problema dando una solución óptima, sino que -

además, proporcionan al usuario una gran cantidad de información adicional que le permite hacer un análisis post-óptimo, esto es, le permiten determinar los rangos de variación de diversos elementos del problema sin que cambie la solución óptima. Otros procesos que es posible realizar con estos paquetes son la parametrización, almacenamiento de la base y cambio arbitrario de un parámetro cualquiera del problema de P.L.

En esta ponencia desarrollamos las bases metodológicas de la programación lineal y presentaremos algunos ejemplos de aplicación.

2. Bases metodológicas de la P.L.

El propósito de este capítulo es presentar de manera uniforme los principales conceptos y resultados de la programación lineal. La idea de establecer de manera formal algunos de estos resultados se justifica de la necesidad de familiarizar al lector con las implicaciones de los mismos, las cuales, son frecuentemente usadas en la interpretación de los reportes de salida de los paquetes comerciales de la programación lineal. Los resultados fundamentales son enunciados y el lector puede recurrir a cualquier libro de programación lineal para su demostración o profundización en el tema.

Este capítulo se divide en cinco secciones, en la primera se dan algunas definiciones y resultados importantes introduciéndo con ellos la notación que se maneja más a menudo. En la segunda sección se define el problema dual, cómo se obtiene y los resultados que caracterizan las soluciones óptimas de la programación lineal: los teoremas de daualidad y complementaridad. En la tercera sección se describe el método Simplex Revisado y se resuelven algunos ejemplos. La sección 4 trata el análisis post-optimo y finalmente, la sección 5 introduce mediante un ejemplo, el concepto de parametrización.

2.1 Conceptos y definiciones de P.L.

Un problema lineal consiste en la maximización o minimización de una función lineal de varias variables sujeta a restricciones lineales en estas mismas variables. Una forma particular, del problema lineal, es la forma estándar:

$$\text{minimice } c_1x_1 + c_2x_2 + \ldots + c_nx_n$$

sujeto a

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \ldots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \ldots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \qquad (P) \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \ldots + a_{mn}x_n &= b_m \\ x_1 \geq 0 \;;\; x_2 \geq 0 \;;\; \ldots \;;\; x_n \geq 0 & \end{aligned}$$

donde los coeficientes a_{ij}, b_i y c_j son números reales, y x_i, $i=1,\ldots,n$ son las variables a determinar. Una forma compacta y usual de escribir (P) es:

$$\begin{aligned} &\text{minimice } cx \\ &Ax = b \\ &x \geq 0 \end{aligned}$$

donde A, es una matriz mxn; c, vector hilera de n componentes; b, un vector columna de m componentes y x, un vector columna de n variables.

Considere el sistema de ecuaciones lineales

$$Ax = b$$

donde A es una matriz mxn; b, vector columna de m componentes; y x, vector columna de n incógnitas. Sea B una submatriz de A de orden mxm que no es singular y suponga que las n-m componentes del vector x no asociadas a las columnas de B se hacen igual a cero. La solución del conjunto de ecuaciones resultante se denomina una <u>solución básica</u> con respecto a la base B. Las componentes de x asociadas a las columnas de B se denominan <u>variables básicas</u>. La solución básica es degenerada si una o más de las variables basicas tiene valor cero.

La idea al definir la solución básica del sistema Ax=b es que si podemos escribir $A = [B, R]$, donde B es una matriz no singular, entonces una solución de este sistema de ecuaciones se puede determinar observando que, si hacemos $Bx_b=b$ el vector $x = [x_B, 0] = [B^{-1}b, 0]$ es la solución que deseamos. Note que en una solución básica no degenerada es inmediata la identificación de las columnas de A que forman la matriz no singular B. Sin embargo, en una solución degenerada existe cierta ambiguedad para identificar B, pues, las variables básicas con valor cero pueden ser confundidas con las variables no básicas cuyo valor es cero también.

Sea el problema lineal en forma estándar

$$\text{minimice } cx$$

sujeto a

$$Ax = b$$

$$x \geq 0$$

Se dice que x es una <u>solución factible</u> si satisface las restricciones de este problema. Si la solución factible es también básica se dice que es una <u>solución factible básica</u>. De manera semejante se define la solución factible básica degenerada. Una solución factible que adquiere el valor mínimo de la función objetivo en el problema lineal se denomina <u>solución óptima</u>. La base B asociada a la solución óptima se denomina <u>base óptima</u>.

TEOREMA FUNDAMENTAL DE LA P.L.

Dado un problema lineal en la forma estándar en donde A es una matriz mxn con rango m:

a. Si existe una solución factible, existe una solución factible básica;

b. Si existe una solución factible óptima, existe una solución factible básica que es óptima.

Este resultado permite reducir el problema a programación lineal a la búsqueda de soluciones básicas cuyo número es finito.

2.2 Problemas lineales duales

Considere los problemas lineales

$$
\begin{array}{lll}
 & \text{minimice } cx & \text{maximice } \lambda b \\
(P) & Ax \geq b & \lambda A \leq c \qquad (D) \\
 & x \geq 0 & \lambda \geq 0
\end{array}
$$

donde A es una matriz mxn; b, un vector columna de m componentes; c, un vector hilera de n componentes; x, un vector columna de n incógnitas; y λ, un vector hilera de m variables. Estos problemas se denominan problemas lineales duales y se dice que (P) es el problema primal y (D) el correspondiente problema dual.

Esta definición de problemas lineales duales permite determinar el problema dual de un problema lineal cualquiera. Esto se obtiene, básicamente, mediante la transformación del problema lineal original a la forma del problema (P).

Ejemplo 1.

Considere el problema lineal en forma estándar

$$
\begin{array}{ll}
 & \text{minimice } cx \\
(P') & Ax = b \\
 & x \geq 0
\end{array}
$$

que puede escribirse en forma equivalente como:

$$\text{minimice} \quad cx$$

$$Ax \geq b$$

$$-Ax \geq -b$$

$$x \geq 0$$

y cuyo correspondiente problema dual es:

$$\text{maximice} \quad ub-vb$$

$$uA-vA \leq c$$

$$u \geq 0 \quad v \geq 0$$

donde u y v son vectores hilera de m componentes. Si $\lambda = u-v$, el correspondiente par de problemas duales asociados es

	minimice cx	maximice λb	
(P')	$Ax = b$	$\lambda A \leq c$	(D')
	$x \geq 0$	λ no restringida	

denominada la <u>forma asimétrica</u>, pues en un problema, el vector de variables es restringido y en el otro es no restringido.

En general, se cumple que si alguna de las restricciones del problema primal es una igualdad, la componente correspondiente del vector λ en el problema dual será una variable no restringida. Recíprocamente, si alguna de las componentes del vector x en el problema primal es no restringida, la desigualdad correspondiente en el problema dual será igualdad.

Ejemplo 2. Determine el dual del problema lineal

$$\begin{aligned} \text{minimice} \quad & cx \\ Ax &\leq b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

Primero conviene reformular este problema como

$$\begin{aligned} \text{minimice} \quad & cx \\ -Ax &\geq -b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

cuyo dual asociado es dado por

$$\begin{aligned} \text{maximice} \quad & -\lambda b \\ -\lambda A &\leq c \\ \lambda &\geq 0 \end{aligned}$$

o si se prefiere, (i.e., el caso usado en paquetes comerciales)

$$\begin{aligned} \text{maximice} \quad & \lambda b \\ \lambda A &\leq c \\ \lambda &\leq 0 \end{aligned}$$

Utilizando estas ideas podemos establecer las formas generales de problemas lineales duales:

PROBLEMAS LINEALES DUALES

P R I M A L	D U A L
Minimice $qy + cx$ $Q_1y + A_1x \geq b_1$ $Q_2y + A_2x = b_2$ $Q_3y + A_3x \leq b_3$ y no restringida ; $x \geq 0$	Maximice $\lambda_1b_1 + \lambda_2b_2 + \lambda_3b_3$ $\lambda_1Q_1 + \lambda_2Q_2 - \lambda_3Q_3 = q$ $\lambda_1A_1 + \lambda_2A_2 - \lambda_3A_3 \leq c$ $\lambda_1 \geq 0$; λ_2 no restringida; $\lambda_3 \geq 0$.
Maximice $qy + cx$ $Q_1y + A_1x \geq b_1$ $Q_2y + A_2x = b_2$ $Q_3y + A_3x \leq b_3$ y no restringida ; $x \geq 0$	Minimice $\lambda_1b_1 + \lambda_2b_2 + \lambda_3b_3$ $-\lambda_1Q_1 + \lambda_2Q_2 + \lambda_3Q_3 = q$ $-\lambda_1A_1 + \lambda_2A_2 + \lambda_3A_3 \geq c$ $\lambda_1 \geq 0$; λ_2 no restringida ; $\lambda_3 \geq 0$.

La relación más importante y significativa de los problemas lineales duales queda resumida en el toerema de dualidad, el cual presenta la relación que existe entre los valores de las funciones objetivo de estos problemas y las relaciones que gobiernan a las restricciones de un problema con las variables de decisión de su dual. Antes de establecer este resultado - conviene señalar que dados los problemas lineales duales

$$
\begin{array}{lcc}
 & \min z = cx & \max z = \lambda b \\
(P) & Ax \geq b & \lambda A \leq c \qquad (D) \\
 & x \geq 0 & \lambda \geq 0
\end{array}
$$

Se cumple que si x_0 y λ_0 (arbitrarias) satisfacen las restricciones de estos problemas se tiene que $cx_0 \geq \lambda_0 b$, pues

$$cx_0 \geq (\lambda A)x_0 = \lambda(Ax_0) \geq \lambda_0 b$$

Asímismo, se tiene que $cx_0 = \lambda_0 b$ implica el par (x_0, λ_0) es la solución de los problemas lineales duales.

TEOREMA DE DUALIDAD

Si alguno de los problemas lineales duales (P) ó (D) tiene solución óptima, lo mismo es cierto del otro problema y el correspondiente valor de la función objetivo es el mismo. Por otra parte, si uno de los problemas tiene función objetivo no acotada, el otro problema no tiene solución factible.

TEOREMA DE COMPLEMENTARIDAD

Considere los problemas lineales duales

$$(P)\quad \begin{array}{l} \min\ z = cx \\ Ax \geq b \\ x \geq 0 \end{array} \qquad\qquad \begin{array}{l} \max\ w = b \\ \lambda A \leq c \\ \lambda \geq 0 \end{array}\quad (D)$$

Sean x^* y λ^* soluciones factibles de los problemas respectivos. Entonces, una condición necesaria y suficiente para que x^* y λ^* sean soluciones óptimas es que satisfagan las relaciones

a. $x_i^* > 0$ implica $\lambda^* a_i = c_i$

b. $x_i^* = 0$ si $\lambda^* a_i < c_i$

c. $\lambda_j^* > 0$ implica $a^j x^* = b_j$

d. $\lambda_j^* = 0$ si $a^j x^* > b_j$

donde a_i (a^j) es el i-ésimo (j-ésima) vector columna (hilera) de la matriz A.

Una interpretación económica de este resultado es como sigue: Si en el problema (P) se tiene una restricción activa, esto es, $a^j x^* = b_j$, entonces el precio a que se compararía una unidad adicional del recurso j es igual a λ_j^*. Además, si la restricción es no activa, esto es $a^j x^* > b_j$, el precio a que se compraría la unidad adicional de recurso es igual a cero. De este resultado se justifica que los elementos λ_j^* $j=1,\ldots,m$, sean denominados los precios sombra o precios de oportunidad.

2.3 El método Simplex Revisado

Existen distintos métodos de solución del problema de programación lineal, el más frecuentemente utilizado para la solución de problemas de programación lineal es el llamado Simplex Revisado. Este método consiste en pasar de una solución factible básica a otra, de tal manera, que en cada paso el valor de la función objetivo disminuya. La terminación del proceso se garantiza en un número finito de pasos, ya que, el número de soluciones factibles es finito. Este método además proporciona elementos suficientes para calcular la solución del problema dual.

Dada la importancia del método simplex revisado conviene describir las bases del mismo:

Considere el problema lineal

$$\text{minimice } z = cx$$
$$Ax = b$$
$$x \geq 0$$

donde A es matriz mxn; b, vector columna de m componentes; c, vector hilera de n componentes; y, x vector de n variables. Suponga que la base B consiste de las primeras m columnas de A. Suponga que particionamos A, x y c como sigue:

$$A = \left[B,\ R\right] \ ; \quad x^t = \left[x_B^t,\ x_B^t\right] \ ; \quad c = \left[c_B,\ c_R\right]$$

Entonces, el problema lineal es equivalente a:

$$\text{minimice } z = c_B x_B + c_R x_R$$

$$Bx_B + Rx_R = b$$

$$x_B \geq 0 \; ; \; x_R \geq 0$$

y una solución factible básica asociada con la base B es $x^t = (x_B, x_R) = (B^{-1}b, 0)$ con valor de la función objetivo $z_0 = c_B x_B = c_B B^{-1} b$. Sin embargo, para valores de $x_R \neq 0$, el vector x_B está dado por $x_B = B^{-1}b - B^{-1}Rx_R$. De donde, sustituyendo x_B en z tenemos

$$z = c_B(B^{-1}b - B^{-1}Rx_R) + c_R x_R$$

$$= c_B B^{-1} b + (c_R - c_B B^{-1} R) x_R$$

$$= z_0 + (c_R - c_B B^{-1} R) x_R$$

y se observa que, si el vector de costos relativos ó reducidos $\bar{c}_R = c_R - c_B B^{-1} R \geq 0$, entonces

$$z_0 \leq c_B B^{-1} b + (c_R - c_B B^{-1} R) x_R = z$$

y por lo tanto, la solución básica original $(x_B, 0)$ es óptima. Este resultado se conoce como: <u>Principio de Optimalidad</u>.

Al expresar el valor de la función objetivo en términos de las variables no básicas x_R, podemos determinar si alguna de ellas debe entrar a la base, o, si el proceso de búsqueda de una solución óptima ha llegado a su fin. Esto es, si la

i-ésima componente del vector de costos relativos es $\bar{c}_{R_j} < 0$ entonces, para valores de x_j positivos tenemos que $\bar{c}_R x_j < 0$. De aquí $z_0 > z$ y por lo tanto, la solución básica anterior no es la mínima y debe considerarse una nueva solución donde x_j esté en la base.

Descripción del Método Simplex Revisado

Suponga que B es una base del problema lineal y que la solución $x = (x_B, 0) = (B^{-1}b, 0)$ es una solución factible.

1. Calcule $\lambda = c_B B^{-1}$. Calcule el vector de costos relativos $\bar{c}_R = c_R - \lambda R$. Si $\bar{c}_R \geq 0$ la solución es óptima.

2. Determine un vector a_j que entre a la base. Este será aquél con costo relativo más negativo. Calcule $y = B^{-1}a_j$ que expresa el vector a_j en términos de la base actual.

3. Determine el vector que sale de la base, esto es, si $\underset{\sim}{b} = B^{-1}b$, $y = B^{-1}a_j$ determine el índice k tal que

$$\underset{\sim}{b}_k/y_k = \min \{ \underset{\sim}{b}_i/y_i \ ; \text{ si } y > 0 \}$$

donde $\underset{\sim}{b}_i$ (y_i) denota el i-ésimo elemento del vector $\underset{\sim}{b}$ (y).

Finalmente, actualice la base (y su inversa) y regrese a 1.

Ejemplo 1. Considere el problema lineal

$$\text{minimice } z = -20x_1 - 10x_2 - x_3$$

$$3x_1 + 2x_2 + 10x_3 \leq 10$$

$$2x_1 + 4x_2 + 20x_3 \leq 15$$

$$x_1 \geq 0 \; ; \; x_2 \geq 0 \; ; \; x_3 \geq 0$$

Para resolver este problema usando el método simplex revisado, se introducen variables de holgura y se obtiene

$$\text{minimice } z = -20x_1 - 10x_2 - x_3$$

$$3x_1 + 2x_2 + 10x_3 + x_4 = 10$$

$$2x_1 + 4x_2 + 20x_3 + x_5 = 15$$

$$x_1 \geq 0 \; ; \; x_2 \geq 0 \; ; \; x_3 \geq 0 \; ; \; x_4 \geq 0 \; ; \; x_5 \geq 0$$

cuya tableau inicial es:

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b
3	2	10	1	0	10
2	4	20	0	1	15
-20	-10	-1	0	0	0

Una base factible inicial puede identificarse inmediatamente del tableau simplex. Por lo tanto:

Iteración 1. $B = [a_4, a_5]$ y $c_B = [0, 0]$. Asimismo,

	B^{-1}		$B^{-1}b$	$B^{-1}a_1$
x_4	1	0	10	3
x_5	0	1	15	2

Entonces $\lambda = c_B B^{-1} = [0, 0]$ y puesto que $R = [a_1, a_2, a_3]$ se tiene que $c_R = [-20, -10, -1]$. Asimismo,

$$\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [-20, -10, -1]$$

Seleccionando al vector a_1 para entrar a la base se tiene de la comparación de $B^{-1}a_1$ con $B^{-1}b$ que el vector que sale de la base es a_4, pues min { 10/3 , 15/2 } = 10/3 .

<u>Iteración 2.</u> Usando $B = [a_1, a_5]$ se tiene que $c_B = [-20, 0]$ y podemos determinar la inversa de la base B, usando el elemento pivote indicado en la iteración anterior.

	B^{-1}		$B^{-1}b$
x_1	1/3	0	10/3
x_5	-2/3	1	25/3

de donde $\lambda = c_B B^{-1} = [-20/3, 0]$ y dado que $R = [a_4, a_2, a_3]$ se tiene que $c_R = [0, -10, -1]$. Asimismo,

$$\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [20/3 , 10/3 , 197/3].$$

Puesto que $\bar{c}_R \geq 0$, la solución óptima es $x_1^* = 10/3$; $x_5^* = 25/3$; $x_2^* = x_3^* = x_4^* = 0$, y la función objetivo es $z^* = -200/3$.

Ejemplo 2. Considere el problema lineal*

$$\text{maximizar } z = 2x_1 + x_2 - 3x_3 + 5x_4$$

$$x_1 + 2x_2 + 4x_3 - x_4 \leq 6$$

$$2x_1 + 3x_2 - x_3 + x_4 \leq 12$$

$$x_1 + x_3 + x_4 \leq 4$$

$$x_1 \geq 0 \; ; \; x_2 \geq 0 \; ; \; x_3 \geq 0 \; ; \; x_4 \geq 0$$

Resolveremos este problema usando el criterio de optimalidad correspondiente, esto es, la solución óptima deberá satisfacer $\bar{c}_R = c_R - \lambda R \leq 0$. Para ello note que el tableau inicial es:

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	b
1	2	4	-1	1	0	0	6
2	3	-1	1	0	1	0	12
1	0	1	1	0	0	1	4
2	1	-3	5	0	0	0	0

y que una base inicial se tiene en forma inmediata, específicamente $B = [a_5, a_6, a_7]$. Por lo que podemos empezar a resolver el problema con el método simplex revisado.

Iteración 1. Sea $B = [a_5, a_6, a_7]$ y $c_B = [0,0,0]$

	B^{-1}			$B^{-1}b$	$B^{-1}a_4$
x_5	1	0	0	6	-1
x_6	0	1	0	12	1
x_7	0	0	1	4	1

De donde, $\lambda = c_B B^{-1} = [0,0,0]$ y $R = [a_1, a_2, a_3, a_4]$. De aquí que $c_R = [2,1,-3,5]$ y $\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [2,1,-3,5]$.

Por lo tanto, se selecciona el vector a_4 para entrar a la base y de la comparación de $B^{-1}b$ con $B^{-1}a_4$ se obtiene que el vector que sale de la base es a_7 pues:

$$\min\{12/1,\ 4/1\} = 4$$

Iteración 2. Usando $B = [a_5, a_6, a_4]$ se tiene que $c_B = [0,0,5]$ y la inversa de la nueva base B puede obtenerse usando el elemento pivote indicado en la iteración anterior.

	B^{-1}			$B^{-1}b$	$B^{-1}a_2$
x_5	1	0	1	10	2
x_6	0	1	-1	8	3
x_4	0	0	1	4	0

de donde $\lambda = c_B B^{-1} = [0,0,5]$ y $R = [a_1,a_2,a_3,a_7]$. Entonces $c_R = [2,1,-3,0]$ y $\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [-3,1,-8,-5]$.

Por lo tanto, se selecciona el vector a_2 para entrar a la base y de la comparación $B^{-1}b$ con $B^{-1}a_2$ se obtiene que a_6 sale de la base ya que

$$\min\{10/2, 8/3\} = 8/3$$

<u>Iteración 3</u>. La nueva base es $B = [a_5,a_2,a_4]$ y $c_B = [0, 1, 5]$. Se tiene la inversa de esta nueva base usando el elemento pivote indicado en la iteración anterior.

	B^{-1}			$B^{-1}b$
x_5	1	-2/3	5/3	14/3
x_2	0	1/3	-1/3	8/3
x_4	0	0	1	4

de donde $\lambda = c_B B^{-1} = [0, 1/3, 14/3]$ y $R = [a_1,a_6,a_3,a_7]$. Entonces $c_R = [2, 0, -3, 0]$ y $\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [-10/3, -1/3, -22/3, -14/3]$

Puesto que $\bar{c}_R \leq 0$ la solución óptima es $x_2^* = 8/3$, $x_4^* = 4$, $x_5^* = 14/3$, $x_1^* = x_3^* = x_6^* = x_7^* = 0$ y el valor de la función objetivo es $z^* = 68/3$. Los valores duales asociados a la solución óptima son: $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 1/3$ y $\lambda_3 = 14/3$.

2.4 Análisis post-óptimo

Este problema surge del interés por conocer la forma en que varía la solución óptima de un problema de programación linea al cambiar algunos de los parámetros usados. El aspecto importante de esta problemática es que, frecuentemente, se requier un mínimo de cálculos adicionales para obtener la nueva solución óptima sin tener que resolver el problema totalmente. Las operaciones requeridas para este análisis se conocen con el nombre de análisis de sensibilidad ó post-óptimo.

El interés de este análisis se enfoca a establecer las condiciones bajo las cuales la base óptima se conserva al variar e vector de recursos y el vector de costos. Asímismo, se dese establecer el costo que representa para la solución óptima la introducción de variables no-básicas. Con el propósito de tener un marco para el análisis del comportamiento del problema lineal considere:

$$
(P) \qquad \begin{aligned} \text{minimice} \quad z &= cx \\ Ax &= b \\ x &\geq 0 \end{aligned}
$$

Suponga que $A = [B, R]$, donde B es una matriz invertible, $c = [c_B, c_R]$ y $x^t = [x_B^t, x_R^t]$. Entonces usando la solución básica x asociada con B podemos transformar (P) en:

$$\text{minimice } z = c_B x_B + c_R x_R$$

$$Bx_B + Rx_R = b$$

$$x_B \geq 0 \; : \; x_R \geq 0$$

Suponiendo que la solución básica $x = [x_B, x_R] = [B^{-1}b, 0]$ es óptima, las condiciones de optimalidad son:

a. $x_B = B^{-1}b \geq 0$

b. $c_R - c_R B^{-1} \geq 0$

donde se observa que la factibilidad del problema primal no depende del vector de costos c; de la misma manera, la factibilidad del problema dual no depende del vector de requerimientos b. Estas observaciones son la base del análisis del problema de variación de datos, pues lo que se buscará es satisfacer las mismas condiciones de optimalidad al cambiar parámetros.

a. <u>Cambio en el vector de requerimientos</u>

Suponga que en el problema original se cambia b por el vector $b + \alpha d$ donde α es un escalar y d es un vector columna de m componentes. Analizaremos las condiciones bajo las cuales la base óptima B sigue siendo óptima. Para la discusión supondremos que la solución óptima original es no degenerada, esto es, $x_B = B^{-1}b > 0$. Note que la condición necesaria y suficiente para que B siga siendo óptima es que

$$B^{-1}(b + \alpha d) \geq 0$$

Sin embargo esto se cumple, al menos, para valores de α pequeños pues $B^{-1}b>0$. En este caso el cambio en la función objetivo es:

$$\Delta z = c_B B^{-1} [b+\Delta b] - c_B B^{-1} b = c_B B^{-1} \Delta b = \lambda \Delta b$$

y se concluye que la solución del problema dual λ es una medida de la rapidez de variación de los valores óptimos de la función objetivo del primal respecto a los requerimientos.

Si definimos $y = B^{-1}d$ se puede verificar que los valores de α para los cuales la base óptima B se conserva están dados por el intervalo $[\underline{\alpha}, \bar{\alpha}]$ en que

$$\bar{\alpha} = \min_i \{-x_{Bi}/y_i \ ; \ y_i < 0\}$$

$$\underline{\alpha} = \max_i \{-x_{Bi}/y_i \ ; \ y_i > 0\}$$

donde x_{Bi} es la componente i-ésima del vector x_B. Esto significa que para valores fuera de este intervalo la solución básica dada por $\underset{\sim}{x}_B = B^{-1}b+\alpha y$, deja de ser factible (y óptima) del problema modificado. En particular, si se tiene que $y = B^{-1}d \geq 0$ la solución básica $\underset{\sim}{x}_B = B^{-1}b+\alpha y$ es óptima para toda $\alpha \geq 0$. Análogamente, si $y \leq 0$ la solución $\underset{\sim}{x}_B$ es óptima para toda $\alpha \leq 0$.

Ejemplo 1. Considere el problema

$$\text{minimice } z = -20x_1 - 10x_2 - x_3$$

$$3x_1 + 2x_2 + 10x_3 + x_4 = 10$$

$$2x_1 + 4x_2 + 20x_3 + x_5 = 15$$

$$x_1 \geq 0 \; ; \; x_2 \geq 0 \; ; \; x_3 \geq 0 \; ; \; x_4 \geq 0 \; ; \; x_5 \geq 0.$$

cuyo tableau simplex inicial es

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_b
3	2	10	1	0	10
2	4	20	0	1	15
-20	-10	-1	0	0	0

y el tableau simplex final es

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	b
1	2/3	10/3	1/3	0	10/3
0	8/3	40/3	-2/3	1	25/3
0	10/3	197/3	20/3	0	200/3

Suponga que deseamos encontrar el intervalo de variación de la primera componente del vector $b^t = [10, 5]$ sin que cambie la base óptima ya determinada. Asímismo, calcule los valores de la función objetivo para los límites de ese intervalo.

La inversa de la base óptima es

$$B^{-1} = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 \\ -2/3 & 1 \end{bmatrix}$$

Considere ahora el cambio del vector b por $b + \alpha e_1$ donde α es un escalar y $e_1' = [1,0]$. Para determinar el intervalo de variación de α hagamos

$$y = B^{-1}e_1 = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 \\ -2/3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 \\ -2/3 \end{bmatrix}$$

El valor máximo de α, denotado $\bar{\alpha}$, es tal que

$$\underset{\sim}{x}_B = B^{-1}b + \alpha y = \begin{bmatrix} 10/3 \\ 25/3 \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} 1/3 \\ -2/3 \end{bmatrix} \geq 0$$

de donde $\bar{\alpha} = (25/3)/(2/3) = 25/2$. El valor mínimo de α es $\underline{\alpha} = (-10/3)/(1/3) = -10$. Por lo tanto la base asociada a la solución óptima original no cambia si el valor de la primera componente de b está en el intervalo $[0, 45/2]$. Los valores de la función objetivo cuando b_1 toma estos valores extremos son:

$$Z(0) = 0 \qquad ; \qquad Z(45/2) = -150$$

b. Cambio en el vector de costos

Suponga que en el problema original se cambia el vector de costos c por $c+\beta h$, donde β es un escalar y h un vector hilera de n componentes. Analizaremos las condiciones bajo las cuales la base óptima B sigue siendo óptima. Supondremos para el análisis que la solución óptima del problema dual es no-degenerada, esto es, el sistema $\lambda A \leq c$, donde $A = [B, R]$ y $c = [c_B, c_R]$ puede expresarse como:

$$\lambda B = c_B \qquad y \qquad \lambda R < c_R$$

que indica que las primeras m desigualdades del sistema se satisfacen con igualdad y las n-m restantes con estricta desigualdad. Sin embargo, puesto que $\lambda = c_B B^{-1}$, la solución óptima no-degenerada implica que

$$c_R - c_B B^{-1} R = c_R - \lambda R > 0$$

Por otra parte, la condición necesaria y suficiente para que la base B siga siendo óptima es que se cumpla

$$\left[c_R + \Delta c_R\right] - \left[c_B + \Delta c_B\right] B^{-1} R \geq 0$$

donde $\left[\Delta c_B, \Delta c_R\right] = \Delta c = \beta h$ es la variación propuesta al vector de costos. Esta expresión equivale a

$$\left[c_R - c_B B^{-1} R\right] + \left[\Delta c_R - \Delta c_B B^{-1} r\right] \geq 0$$

y se satisface para el caso que se analiza con valores de β suficientemente pequeños, debido a que la solución óptima del

problema dual es no-degenerada. Si la base B sigue siendo óptima el vector $\underset{\sim}{\lambda} = \left[c_B + \Delta c_B\right]B^{-1}$ es la solución óptima del dual y el cambio en la función objetivo es

$$\Delta w = \left[c_B + \Delta c_B\right] B^{-1}b - c_B B^{-1}b = \Delta c_B B^{-1}b$$

que equivale a $\Delta w = \Delta c_B x_B + \Delta c_R x_R = \Delta c x$ pues $x_R=0$ y $x_B=B^{-1}b$. De donde se concluye que la solución óptima del problema primal representa la rapidez de cambio de la función objetivo del problema dual respecto al vector de costos.

Si $\bar{c}_R = \left[c_R - c_B B^{-1}R\right] > 0$ y $s = h_R - h_B B^{-1}R$ puede verificarse que los límites de β para los cuales la base B no cambia quedan dados por el intervalo $\left[\underline{\beta}\ ,\ \bar{\beta}\right]$ donde

$$\bar{\beta} = \min\ \{-\bar{c}_{Rj}/s_j \quad ; \quad s_j < 0\}$$

$$\underline{\beta} = \max\ \{-\bar{c}_{Rj}/s_j \quad ; \quad s_j > 0\}$$

Aquí $\bar{c}_{Rj}$ es la componente i-ésima de $\bar{c}_R$ (y lo mismo sucede con s_j). Finalmente note que si $s \geq 0$ el vector solución $\underset{\sim}{\lambda} = \left[c_B + \beta h_B\right]B^{-1}$ es óptimo para toda $\beta \geq 0$. Análogamente, si $s \leq 0$, la solución $\underset{\sim}{\lambda}$ es óptima para toda $\beta \leq 0$.

Ejemplo 2. Determine el intervalo de variación de la primera componente del vector de costos del ejemplo 1 (de esta sección) sin que cambie la base óptima original.

En el ejemplo 1 se estableció que

$$B^{-1} = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 \\ -2/3 & 1 \end{bmatrix}$$

donde $B = [a_1, a_5]$ y $R = [a_2, a_3, a_4]$. Asímismo, se verifica que $c_B = [-20, 0]$ y $c_R = [-10, -1, 0]$. De donde para determinar el intervalo de variación de la primer componente de c_B, que coincide con la primer componente de c, define el vector $h = [1, 0, 0, 0, 0]$. Entonces $h_B = [1, 0]$, $h_R = [0, 0, 0]$ y

$$\bar{c}_R = c_R - c_B B^{-1} R = [10/3, 197/3, 20/3]$$

$$S = h_R - h_B B^{-1} R = [-2/3, -10/3, -1/3]$$

Por lo tanto la cota superior de β es dada por

$$\bar{\beta} = \min \left\{ \frac{-10/3}{-2/3}, \frac{-197/3}{-10/3}, \frac{-20/3}{-1/3} \right\} = 5$$

Por otra parte $S \leq 0$ que implica $\beta_{min} = -\infty$. De aquí se concluye que el intervalo de variación de la primera componente de c, sin que cambie la base, es $(-\infty, -15)$. De donde tenemos que:

$$Z(-\infty) = -\infty \quad , \quad Z(-15) = -50$$

Ejemplo 3. Considere el problema

$$\text{maximizar } z = 2x_1 + x_2 - 3x_3 + 5x_4$$

sujeto a
$$x_1 + 2x_2 + 4x_3 - x_4 \leq 6$$
$$2x_1 + 3x_2 - x_3 + x_4 \leq 12$$
$$x_1 + x_3 + x_4 \leq 4$$

$x_1 \geq 0$; $x_2 \geq 0$; $x_3 \geq 0$; $x_4 \geq 0$; $x_5 \geq 0$; $x_6 \geq 0$; $x_7 \geq 0$.

cuyo tableau inicial, con variables de holgura es:

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	b
1	2	4	-1	1	0	0	6
2	3	-1	1	0	1	0	12
1	0	1	1	0	0	1	4
2	1	-3	5	0	0	0	0

La base óptima $B = [a_5, a_2, a_4]$ y su inversa son:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 0 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad B^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -2/3 & 5/3 \\ 0 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se desea determinar el intervalo de variación de cada una de las componentes de los vectores de requerimientos y de costos, sin que cambie la base óptima original. Asímismo, calcule los valores de la función objetivo para los puntos límites de dicho intervalo.

Primero observe que la solución es dada por

$$x_B^* = [x_5, x_2, x_4] = [14/3, 8/3, 4]$$

y que $x_R^* = [x_1, x_3, x_6, x_7] = [0, 0, 0, 0]$. Asímismo, la solución del problema dual es $\lambda^* = [0, 1/3, 14/3]$. Si deseamos determinar el intervalo de variación de b_1, la primera componente de b, sin que cambie la base, sea:

$$\underset{\sim}{b} = b + \alpha e_1^t = \begin{bmatrix} 6 \\ 12 \\ 4 \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Para que B siga siendo óptima se debe cumplir que:

$$B^{-1}\underset{\sim}{b} = \begin{bmatrix} 14/3 \\ 8/3 \\ 4 \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \geq 0$$

esto es, $B^{-1}b \geq 0$. Sin embargo, esto es cierto cuando $\alpha \geq -14/3$, que equivale a tener $\underset{\sim}{b}_1 \geq 6 - 14/3 = 4/3$. Asímismo,

$$x_B = B^{-1}\underset{\sim}{b} = \begin{bmatrix} x_5 \\ x_2 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -2/3 & 5/3 \\ 1 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underset{\sim}{b}_1 \\ 12 \\ 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underset{\sim}{b}_1 - 4/3 \\ 8/3 \\ 4 \end{bmatrix}$$

En el valor mínimo, $x_B^t = [0, 8/3, 4]$, por lo tanto $z = 68/3$.

Procediendo de manera semejante se tiene que el intervalo de variación de la segunda componente de $\underset{\sim}{b}$ es:

$$4 \leq \underset{\sim}{b}_2 \leq 19$$

y además los valores de x_B en función de $\underset{\sim}{b}_2$ son:

$$x_B = \begin{bmatrix} x_5 \\ x_2 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{38}{3} - \frac{2}{3}\underset{\sim}{b}_2 \\ \frac{b_2}{3} - \frac{4}{3} \\ 4 \end{bmatrix}$$

por lo tanto $Z(\underset{\sim}{b}_2) = \underset{\sim}{b}_2/3 + 56/3$; $Z(4) = 20$ y $Z(19) = 25$

Análogamente se obtiene que el intervalo de variación de $\underset{\sim}{b}_3$ es:

$$6/5 \leq \underset{\sim}{b}_3 \leq 12$$

y los valores x_B en función de $\underset{\sim}{b}_3$ son :

$$x_B = \begin{bmatrix} x_5 \\ x_2 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{5}{3}\underset{\sim}{b}_3 - 2 \\ 4 - \underset{\sim}{b}_3/3 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

de donde $Z(\underset{\sim}{b}_3) = \frac{14}{3}\underset{\sim}{b}_3 + 4$; $Z(6/5) = 9.6$ y $Z(12) = 60$.

Para analizar la variación de los coeficientes del vector de costos debemos especificar, primeramente, si son elementos de

$$c_B = \left[c_5, c_2, c_4\right] \quad ó \quad c_R = \left[c_1, c_6, c_3, c_7\right]$$

Suponga que se desea variar un elemento de c_R. Entonces la condición de optimalidad que debe satisfacerse es:

$$\bar{\underset{\sim}{c}}_R = \underset{\sim}{c}_R - c_B B^{-1} R \leq 0$$

donde $\underset{\sim}{c}_R = c_R + \alpha e_i$, $i=1,3,6,7$. Note que $\underset{\sim}{c}_R$ es el nuevo vector de costos no-básicos. En particular, si $i=1$, tenemos que:

$$\bar{\underset{\sim}{c}}_R = (\alpha - 10/3,\ -1/3,\ -22/3,\ -14/3) \leq 0$$

de donde $\alpha \leq 10/3$, lo cual es equivalente a $c_1 \leq 16/3$. Además, el valor de la función objetivo cuando c_1 toma este valor extremo no se altera porque la variable x_1 no está en la base. De manera análoga, se obtiene que $c_3 \leq 13/3$ y para los coeficientes c_6 y c_7, correspondientes a las variables de holgura, resulta que $c_6 \leq 1/3$ y $c_7 \leq 14/3$.

Si la componente a variar es un elemento de c_B entonces la condición de optimalidad que se debe satisfacer es:

$$\bar{\underset{\sim}{c}}_R = c_R - \underset{\sim}{c}_B B^{-1} R \leq 0$$

donde $\underset{\sim}{c}_B = c_B + \alpha e_i$, $i=2,4,5$. En particular, si $i=2$ se tiene que $\underset{\sim}{c}_B = (0,\ 1+\alpha,\ 5)$ y que

$$0 \geq \bar{c}_R = -\frac{1}{3}\left[10 + \alpha,\ 1 + \alpha,\ 22 - 2\alpha,\ 14-\alpha\right]$$

que implica $-1 \leq \alpha \leq 11$ y equivalentemente $0 \leq c_2 \leq 12$. Además, si se sustituye el coeficiente $c_2=1$ de la función objetivo por estos valores extremos se obtiene en cada caso:

$$Z(0) = 20.0 \quad y \quad Z(12) = 52.0$$

De manera análoga, resulta que $c_4 \geq 5/3$ y sustituyendo este valor extremo en la función objetivo nos queda:

$$Z(5/3) = 28/3$$

Para el coeficiente c_5 que corresponde a la variable de holgura básica x_5, el proceso es el mismo y se obtiene que:

$$-\frac{22}{19} \leq c_5 \leq \frac{1}{2}$$

los valores de la función objetivo al sustituir estos extremos son:

$$Z(-22)/19) = 17.26316 \quad y \quad Z(1/2) = 25.$$

c. Introducción de variables no-básicas

Otro aspecto importante del análisis post-óptimo es la evaluación de los cambios en la función objetivo debidos a la introducción de variables no-básicas en la solución óptima del problema de programación lineal. Específicamente, sea B la base óptima del problema lineal cuya solución general es:

$$x_B = B^{-1}b - B^{-1}Rx_R \geq 0 \qquad (1)$$

donde x_B es óptima cuando $x_R = 0$. Suponga que la variable no-básica x_i puede tener valores distintos de cero y que las otras variables no-básicas permanecen con valor igual a cero. Se desea determinar el intervalo de variación de dicha variable no-básica sin que cambie la base óptima. La consecuencia de que la variable no básica tenga valores fuera de este intervalo es que al menos una variable básica se vuelve no factible. El proceso de determinación de la primera variable básica que se hace no factible en cada extremo se denomina "LIMITING PROCESS" en los listados de computadora. Si la variable básica en cuestión es de holgura, la pérdida de factibilidad es equivalente a la no factibilidad de la restricción en que se encuentra dicha variable de holgura.

Finalmente se desea determinar el costo unitario de disminución de beneficios debidos a la introducción de esta variable y los correspondientes valores de la función objetivo en los extremos de dicho intervalo.

Ejemplo 4. Considere el problema:

$$\text{Maximizar } z = 2x_1 + x_2 - 3x_3 + 5x_4$$

sujeto a

$$x_1 + 2x_2 + 4x_3 - x_4 \leq 6$$

$$2x_1 + 3x_2 - x_3 + x_4 \leq 12$$

$$x_1 + x_3 + x_4 \leq 4$$

$$x_1 \geq 0 \; ; \; x_2 \geq 0 \; ; \; x_3 \geq 0 \; ; \; x_4 \geq 0$$

cuyo tableau inicial con variables de holgura es:

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	b
1	2	4	-1	1	0	0	6
2	3	-1	1	0	1	0	12
1	0	1	1	0	0	1	4
2	1	-3	5	0	0	0	0

y cuyo tableau óptimo es:

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	$B^{-1}b$
4/3	0	19/3	0	1	-2/3	5/3	14/3
1/3	1	-2/3	0	0	1/3	-1/3	8/3
1	0	1	1	0	0	1	4

Determine los intervalos de variación de las variables no-básicas sin que cambie la base. Asímismo, determine los costos unitarios de disminución de beneficios debidos a la introducción de las variables no-básicas en la solución óptima y los correspondientes valores de la función objetivo en los extremos de dichos intervalos.

Para ello, suponga que la variable x_1 puede tener valores distintos de cero y que las otras variables no-básicas permanecen con valor igual a cero. Entonces, sustituyendo valores en la relación (1) se tiene que:

$$x_B = \begin{bmatrix} x_5 \\ x_2 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 14/3 \\ 8/3 \\ 4 \end{bmatrix} \quad - \quad \begin{bmatrix} 4/3 \\ 1/3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad x_1$$

Los valores de x_1 para los cuales $x_B \geq 0$ son dados por $x_1 \leq 7/2$. Note que cuando $x_1 > 7/2$ se tiene $x_5 < 0$ que es equivalente a que la restricción uno no se cumpla pues

$$x_1 + 2x_2 + 4x_3 - x_4 = 6-x_5$$

En este caso se dice que la restricción uno es la que limita el que la variable x_1 pueda tener valores mayores que 7/2. Por otra parte observe que el valor de la función objetivo al considerarse x_1 en la solución óptima es

$$Z = 2x_1 + (8/3 - 1/3x_1) + 5(4-x_1) = 68/3 - 10/3x_1$$

De donde el costo unitario debido a la introducción de x_1 es igual a 10/3 y los límites de la función objetivo para los valores extremos de x_1 son $Z = -\infty$ y $Z = 11$.

Considere ahora la introducción de la variable no-básica x_3 en la solución óptima. Primero conviene analizar el intervalo de valores que puede tener x_3 sin que cambie la base. Sea

$$x_B = \begin{bmatrix} x_5 \\ x_2 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14/3 \\ 8/3 \\ 4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 19/3 \\ -2/3 \\ 1 \end{bmatrix} x_3$$

De donde los valores de x_3 tales que $x_B \geq 0$ están dados por $-4 \leq x_3 \leq 14/19$. Note que si $x_3 < -4$ entonces la variable básica x_2 deja de ser factible; si $x_3 > 14/19$ entonces $x_5 < 0$ que equivale a decir que la restricción uno no se satisface. En la operación "LIMITING PROCESS" se dirá que x_2 y la restricción uno limitan la variación de x_3 más allá de los límites determinados para esta variable. Asímismo, se observa que el valor de la función objetivo al introducir x_3 es

$$Z = 68/3 - 22/3x_3$$

que equivale a decir que el costo unitario de deterioro de la función objetivo es 22/3. En particular, los valores extremos de esta función para los límites de variación de x_3 son:

$$Z(-4) = 52 \quad ; \quad Z(14/19) = 17.2631$$

2.5 Parametrización

En el análisis post-óptimo se discute únicamente los cambios de datos del problema lineal sin que exista cambio de la base óptima. La parametrización proporciona una visión más amplia, pues nos permite analizar el comportamiento de la solución óptima y el valor de la función objetivo, aún cuando existan cambios en la base óptima. Este análisis permite conocer la influencia de cada una de las componentes del vector de recursos o de costos en la función objetivo. La curva resultante se denomina función de beneficios y es importante para estudios económicos más globales, en donde se distribuyen recursos escasos a unidades productivas. Un ejemplo típico de esto, en el caso de planeación agrícola, se tiene al determinar los beneficios económicos de un distrito de riego en la función del volumen de agua que se le asigne.

Considere los dos tipos más usuales de parametrización. El primero queda dado por

$$
\begin{aligned}
z(\alpha) = \text{maximice} \quad & cx \\
Ax &= b + \alpha d \\
x &\geq 0
\end{aligned}
$$

donde se desea saber la forma de la función $z(\alpha)$ cuando varía α. Se puede demostrar que la forma típica de esta función es:

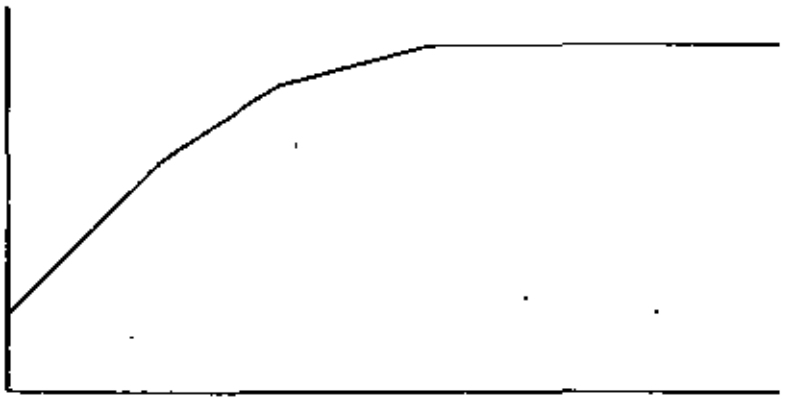


Fig. 2.1 Curva de variación del lado derecho.

El segundo tipo de problema está dado por:

$$Z(\alpha) = \max(c + \alpha h)x$$

$$Ax = b$$

$$x \geq 0$$

En este caso puede demostrarse que la forma de la función $Z(\alpha)$ cuando varía α es como sigue:

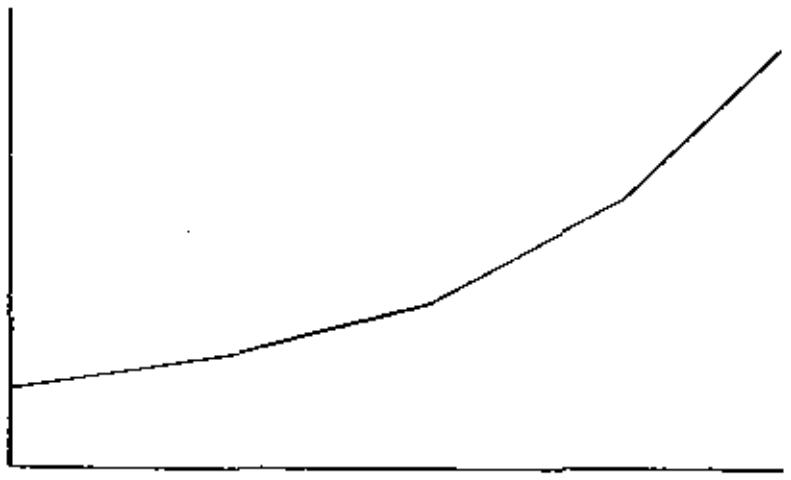


Fig. 2.2 Curva de variación de costos.

Ejemplo 1. Considere el problema:

$$\text{Maximizar } z = 2x_1 + x_2 - 3x_3 + 5x_4$$

sujeto a

$$x_1 + 2x_2 + 4x_3 - x_4 \leq \alpha$$

$$2x_1 + 3x_2 - x_3 + x_4 \leq 12$$

$$x_1 + x_3 + x_4 \leq 4$$

$$x_1 \geq 0 \; ; \; x_2 \geq 0 \; ; \; x_3 \geq 0 \; ; \; x_4 \geq 0$$

cuyo tableau inicial con variables de holgura es:

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	b
1	2	4	-1	1	0	0	α
2	3	-1	1	0	1	0	12
1	0	1	1	0	0	1	4
2	1	-3	5	0	0	0	0

Se desea determinar la curva de beneficios máximos de este problema en función del parámetro α.

Iteración 1. Sean $B = [a_5, a_6, a_7]$ y $c_B = [0, 0, 0]$

	B^{-1}			$B^{-1}b$	$B^{-1}a_4$
x_5	1	0	0	α	-1
x_6	0	1	0	12	1
x_7	0	0	1	4	1

Entonces $\lambda = c_B B^{-1} = [0,0,0]$ y $R = [a_1, a_2, a_3, a_4]$. Asímismo, se tiene que $c_R = [2,1,-3,5]$ y $\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [2,1,-3,5]$. Se selecciona el vector a_4 para entrar a la base y el vector a_7 sale de la base, ya que min {12/1, 4/1} = 4.

Iteración 2. La nueva base es $B = [a_5, a_6, a_4]$ y $c_B = [0,0,5]$.

	B^{-1}			$B^{-1}b$	$B^{-1}a_2$
x_5	1	0	1	$\alpha + 4$	2
x_6	0	1	-1	8	3
x_4	0	0	1	4	0

La inversa de B se calculó con el elemento pivote de la iteración anterior. Entonces $\lambda = c_B B^{-1} = [0,0,5]$ y $R = [a_1, a_2, a_3, a_7]$. Asímismo, $c_R = [2,1,-3,0]$ y $\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [-3,1,-8,-5]$. Se selecciona al vector a_2 para entrar a la base y de la comparación de $B^{-1}b$ y $B^{-1}a_2$ se obtiene que:

$$\min\{(\alpha+4)/2, 8/3\} = \begin{cases} 8/3 & \text{si } \alpha \geq 4/3 \\ (\alpha+4)/2 & \text{si } \alpha \leq 4/3 \end{cases}$$

Iteración 3. ($\alpha \leq 4/3$). La nueva base es $B = [a_2, a_6, a_4]$ y $c_B = [c_2, c_6, c_4] = [1,0,5]$. Usando el elemento pivote (línea punteada) de la iteración 2 se tiene:

	B^{-1}			$B^{-1}b$
x_2	1/2	0	1/2	$2+\alpha/2$
x_6	-3/2	1	-5/2	$2-3\alpha/2$
x_4	0	0	1	4

Entonces $\lambda = c_B B^{-1} = [1/2, 0, 11/2]$ y $R = [a_1, a_6, a_3, a_7]$. Asímismo $c_R = [2, 0, -3, 0]$ y $\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [-4, 0, -21/2, -11/2]$.
Por lo tanto, si $-4 \leq \alpha \leq 4/3$, la solución óptima es:
$x_2^* = 2+\alpha/2$, $x_4^* = 4$, $x_6^* = 2-3\alpha/2$, $x_1^* = x_3^* = x_5^* = x_7^* = 0$ y el valor de la función objetivo es $z^* = 22 + \alpha/2$.

<u>Iteración 3</u>. $(\alpha \geq 4/3)$. $B = [a_5, a_2, a_4]$ y $c_B = [c_5, c_2, c_4]$.

	B^{-1}			$B^{-1}b$
x_5	1	-2/3	5/3	$\alpha-4/3$
x_2	0	1/3	-1/3	8/3
x_4	0	0	1	4

de donde $\lambda = c_B B^{-1} = [0, 1/3, 14/3]$ y $R = [a_1, a_6, a_3, a_7]$. Asímismo $c_R = [2, 0, -3, 0]$ y $\bar{c}_R = c_R - \lambda R$ $[-10/3, -1/3, -22/3, -14/3]$.
Puesto que $\bar{c}_R \leq 0$ se tiene que la solución óptima es
$x_2^* = 8/3$; $x_4^* = 4$ y $x_5^* = \alpha-4/3$, $x_1^* = x_3^* = x_6^* = x_7^* = 0$ y el valor de la función objetivo es $z^* = 68/3$.

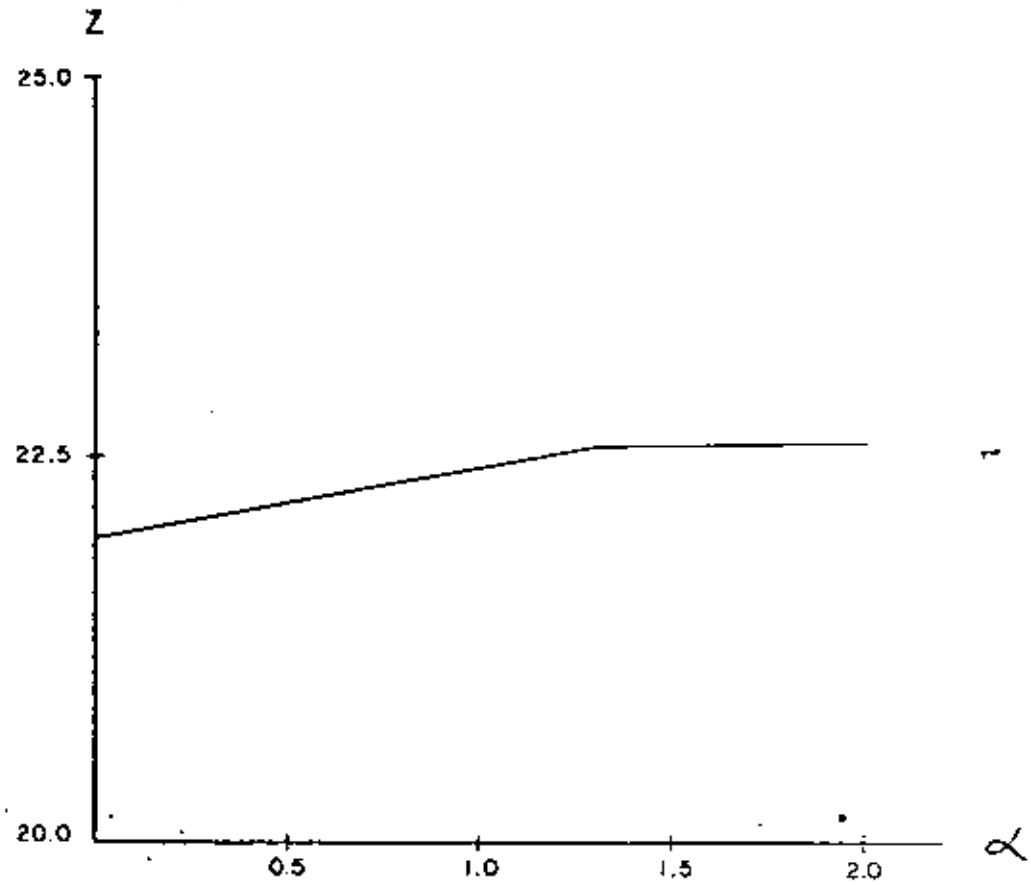


Fig. 2.3 Curva de variación del lado derecho.

Ejemplo 2. Considere el problema

$$\text{Maximizar } z = \alpha x_1 + x_2 - 3x_3 + 5x_4$$

sujeto a

$$x_1 + 2x_2 + 4x_3 - x_4 \leq 6$$

$$2x_1 + 3x_2 - x_3 + x_4 \leq 12$$

$$x_1 + x_3 + x_4 \leq 4$$

$$x_1 \geq 0 \; ; \; x_2 \geq 0 \; ; \; x_3 \geq 0 \; ; \; x_4 \geq 0$$

y suponga que se desea determinar la curva de beneficios máximos al variar el parámetro α. El tableau inicial con variables de holgura es

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	b
1	2	4	-1	1	0	0	6
2	3	-1	1	0	1	0	12
1	0	1	1	0	0	1	4
α	1	-3	5	0	0	0	0

Iteración 1 : Sea $B = [a_5, a_6, a_7]$ y $c_B = [0,0,0]$

	B^{-1}			$B^{-1}b$	$B^{-1}a_4$
x_5	1	0	0	6	-1
x_6	0	1	0	12	1
x_7	0	0	1	4	1

de donde, $\lambda = c_B B^{-1} = [0,0,0]$ y $R = [a_1,a_2,a_3,a_4]$. Asímismo, $c_R = [\alpha,1,-3,5]$ y $\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [\alpha,1,-3,4]$. Se selecciona el vector a_4 para entrar a la base y sale de la base el vector a_7

<u>Iteración 2</u>. Sean $B = [a_5,a_6,a_4]$ y $c_B = [0,0,5]$.

		B^{-1}		$B^{-1}b$	$B^{-1}a_2$
x_5	1	0	1	10	2
x_6	0	1	-1	8	3
x_4	0	0	1	4	0

donde la inversa de B se obtuvo con el elemento pivote indicado en la iteración anterior. Se tiene $\lambda = c_B B^{-1} = [0,0,5]$ y $R = [a_1,a_2,a_3,a_7]$. Asímismo $c_R = [\alpha,1,-3,0]$ y tenemos que $\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [\alpha-5,1,-8,-5]$. Se selecciona el vector a_2 para entrar a la base y el vector a_6 sale de la base.

<u>Iteración 3</u>. Sea $B = [a_5,a_2,a_4]$ y $c_B = [0,1,5]$

		B^{-1}		$B^{-1}b$	$B^{-1}a_1$
x_5	1	-2/3	5/3	14/3	4/3
x_2	0	1/3	-1/3	8/3	1/3
x_4	0	0	1	4	1

De donde $\lambda = c_B B^{-1} = [0,1/3,14/3]$ y $R = [a_1,a_6,a_3,a_7]$.

Entonces, $c_R = [\alpha, 0, -3, 0]$ y

$$\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [\alpha - 16/3, -1/3, -22/3, -14/3]$$

Si $\alpha \leq 16/3$ la solución es óptima y es:

$x_2^* = 8/3$; $x_4^* = 4$; $x_5^* = 14/3$; $x_1^* = x_3^* = x_6^* = x_7^* = 0$
con valor de la función objetivo $z(\alpha) = 68/3$.

<u>Iteración 4</u>. Si $\alpha \geq 16/3$ entonces el vector a_1 entra a la base y sale el vector a_5. Sean $B = [a_1, a_2, a_4]$ y $c_B = [\alpha, 1, 5]$.

	B^{-1}			$B^{-1}b$	$B^{-1}a_b$
x_1	3/4	-1/2	5/4	7/2	-1/2
x_2	-1/4	1/2	-3/4	3/2	1/2
x_4	-3/2	1/2	-1/4	1/2	1/2

de donde $\lambda = c_B B^{-1} = [-4+3\alpha/4, 3-\alpha/2, -2+5\alpha/4]$ y se tiene que $R = [a_5, a_6, a_3, a_7]$. Entonces $c_R = [0, 0, -3, 0]$ y

$$\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [4-3\alpha/4, \alpha/2-3, 22/3-11\alpha/4, 2-5\alpha/4]$$

Si $16/3 \leq \alpha \leq 6$, la solución es óptima y es:

$$x_1^* = 7/2 \ ; \ x_2 = 3/2 \ ; \ x_4^* = 1/2 \ ; \ x_3^* = x_5^* = x_6^* = x_7^* = 0$$

cuyo valor de la función objetivo es $z(\alpha) = 7\alpha/2 + 4$.

<u>Iteración 5</u>. Si $\alpha \geq 6$ entonces el vector a_6 entra a la base y sale el vector a_4. Sean $B = [a_1, a_2, a_6]$ y $c_B = [\alpha, 1, 0]$.

		B^{-1}		$B^{-1}a_4$
x_1	0	0	1	1
x_2	1/2	0	-1/2	1
x_6	-3/2	1	-1/2	1

Entonces $\lambda = c_B B^{-1} = [1/2, 0, \alpha-1/2]$ y $R = [a_5, a_4, a_3, a_7]$.
Asímismo $c_R = [0, 5, -3, 0]$ y

$$\bar{c}_R = c_R - \lambda R = [-1/2, 6-\alpha, -\alpha-9/2, -\alpha+1/2]$$

Si $\alpha \geq 6$ tenemos que $\bar{c}_R \leq 0$ y la solución actual es óptima:

$$x_1^*=4 \ ; \ x_2^*=1 \ ; \ x_6^*=1 \ ; \ x_3^*=x_4^*=x_5^*=x_7^*=0$$

con valor de la función objetivo igual a $z(\alpha) = 4\alpha+1$.

La gráfica de la función de beneficios máximos resultante al variar el parámetro α en el problema resuelto se proporciona en la siguiente hoja.

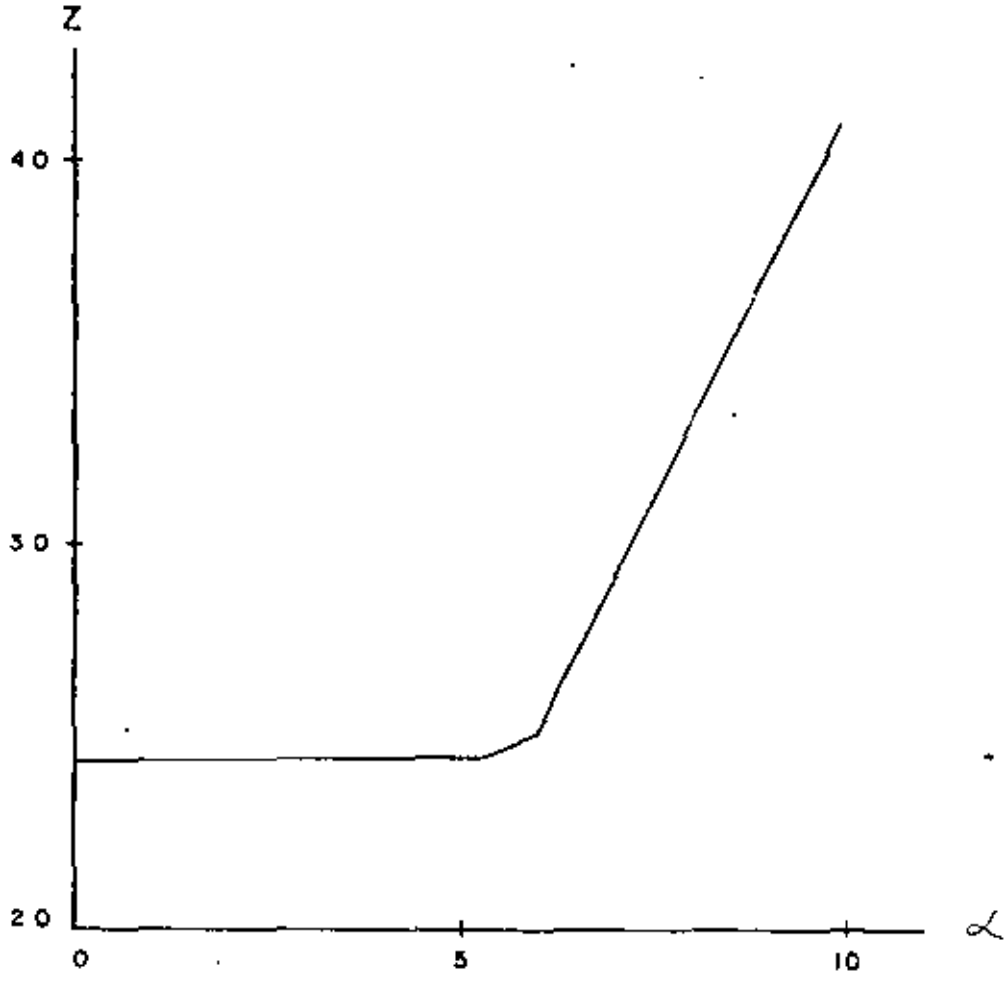


Fig. 2.4 Curva de variación del vector de costos.

1. PROBLEMA DE CONTRATACION.

La compañía Aeronaves del Pacífico necesita determinar cuántas aeromozas contratar y adiestrar en los próximos seis meses. Las necesidades de la compañía expresadas como horas-vuelo-aeromoza son:

enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio
8000	9000	7000	10000	9000	11000

El entrenamiento necesario para que una aeromoza dé servicio en un vuelo dura un mes; por lo que cada muchacha debe contratarse por lo menos un mes antes.

El entrenamiento necesita 100 horas de supervisión de aeromoza ya entrenadas, por lo que se dispone 100 horas-vuelo-aeromoza menos, durante un mes por cada aeromoza en entrenamiento. Cada aeromoza entrenada puede trabajar 150 horas en un mes y la compañía áerea tiene 60 aeromozas entrenadas al principio de enero.

Por razones sindicales, si el tiempo máximo disponible de las aeromozas entrenadas excede al requerido por la compañía en el mes (horas-vuelo y supervisión), éstas trabajarán menos de 150 horas y no se despide a nadie. Sin embargo, en cada mes aproximadamente 10% de las aeromozas con experiencia dejan el trabajo por razones de matrimonio u otras. Además, en cada mes, 5% de las personas que se contratan (y terminan su entrenamiento), son rechazadas por varias razones.

Si se consideran los salarios y otros beneficios, cada aeromoza adiestrada cuesta a la compañía \$8,000.00 mensuales, y cada aeromoza en entrenamiento, \$4,000.00.

La compañía desea determinar el plan de contratación y adiestramiento de aeromozas a costo mínimo.

Formulación:

Sea x_t número de personas contratadas al inicio del mes t

y_t número de aeromozas con entrenamiento al inicio del mes t.

D_t número de horas-vuelo-aeromoza necesarias en el mes t.

En este caso el problema consiste en

$$\text{minimizar } z = 800 \sum_{t=1}^{6} y_t + 4000 \sum_{t=1}^{5} x_t$$

sujeto a

$$y_{t+1} = 0.95x_t + 0.9y_t \qquad t=1,2,\ldots,5$$

$$150y_t \geq D_t + 100x_t \qquad t=1,2,\ldots,6$$

$$y_1 = 60$$

$$x_t \geq 0 \quad ; \quad y_{t+1} \geq 0 \qquad t=1,2,\ldots,5.$$

2. PROBLEMA DE INVERSIONES

Un inversionista dispone de $40,000.00 y desea establecer un plan de inversiones que maximice la cantidad de dinero que puede acumular al final de los próximos cinco años.

El inversionista dispone de varias actividades financieras. En la actividad A, cada peso invertido al comienzo de un año produce $ 1.50 (una ganancia de 0.50) dos años más tarde (en el momento preciso para una reinversión). En la actividad B, cada peso invertido al principio de un año le produce $ 1.80 tres años después. Se tienen además dos actividades financieras; C y D, que estarán disponibles solamente una vez en el futuro. Cada peso invertido en C, en el comienzo del segundo año, le produce $ 2.25 cuatro años más tarde. Finalmente, en la actividad D, cada peso invertido al principio del quinto año le produce $ 1.30 un año más tarde.

Formulación:

Sea x_{ij} la cantidad de dinero invertido al principio del año i en la cantidad j (i=1,2,3,4,5) ; (j=A,B,C,).

w_i, la cantidad de dinero que no se invierte al principio del año i. i=1,2,3,4,5.

En este caso se desea maximizar el dinero acumulado al final del quinto año, esto es, se desea

$$\text{maximizar } z = 1.7x_{4A} + 1.8x_{4B} + 2.25x_{2C} + 1.30x_{5D}$$

sujeto a

$$x_{1A} + x_{1B} + w_1 = 40000$$

$$x_{2A} + x_{2B} + x_{2C} + w_2 = w_1$$

$$x_{3A} + x_{3B} + w_3 = w_2 + 1.5x_{1A}$$

$$x_{4A} + w_4 = w_3 + 1.5x_{2A} + 1.8x_{1B}$$

$$x_{5D} = w_4 + w_4 + 1.5x_{3A} + 1.8x_{2B}$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad i=1,2,3,4,5 \quad j=A,B,C,D.$$

$$w_{ij} \geq 0 \quad i=1,2,3,4.$$

3. PROBLEMAS DE REGRESION

Un problema importante en el campo de la estadística es el denominado problema de regresión lineal. A grandes rasgos, éste consiste en determinar la línea recta que mejor representa un conjunto de datos estadísticos como $(x_1,y_1),\ldots,(x_n,y_n)$. Suponiendo que la línea recta es dada por la ecuación $y = a + bx$, el propósito es determinar las constantes a y b que proporcionan la mejor representación de los datos de acuerdo a un criterio especificado. Algunos de los criterios, en que la programación lineal es útil, son:

a. minimice $\sum_{i=1}^{n} |y_i - a - bx_i|$.

b. minimice $\{$ máximo $|y_i - a - bx_i|$; $i=1,2,3,\ldots, n\}$.

En cada uno de estos criterios se minimizan las desviaciones entre los valores observados y aquéllos que son calculados por medio de la ecuación de la recta.

Una forma de reformular el problema dado por el criterio a es como sigue. Observe que éste es equivalente a

$$\text{minimizar} \sum_{i=1}^{n} z_i$$

$$z_i \geq |y_i - a - b_i x_i| \qquad i=1,\ldots,n$$

$$z_i \geq 0 \qquad i=1,\ldots,n$$

Asimismo, usando la definición de valor absoluto, se tiene que el problema es equivalente a

$$\text{minimizar} \sum_{i=1}^{n} z_i$$

$$z_i \geq y_i - a - bx_i \qquad i=1,\ldots,n$$

$$z_i \geq -y_i + a + bx_i \qquad i=1,\ldots,n$$

$$z_i \geq 0 \qquad i=1,\ldots,n$$

que es un problema de programación lineal. Por otra parte, considere el problema de regresión con criterio b y observe que éste es equivalente a

$$\text{minimizar } z$$

$$z \geq |y_i - a - bx_i| \qquad i=1,\ldots,n$$

De donde podemos concluir que el problema de regresión es equivalente a

$$\text{minimizar } z$$

$$z \geq y_i - a - bx_i \qquad i=1,\ldots,n$$

$$z \geq -y_i + a + bx_i \qquad i=1,\ldots,n$$

$$z \geq 0$$

que es un problema de programación lineal.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

MODELOS PARA LA PLANEACION DEL USO DEL SUELO Y EL TRANSPORTE

M. EN C. JOSE LUIS SOBERANES REYES

NOVIEMBRE, 1980

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

1. INTRODUCCION

El objetivo de este documento es presentar una breve descripción de las bases, objetivos, y teorías de modelos para la planeación del uso del suelo y el transporte.

No es el propósito de estas notas el realizar una revisión exhaustiva de todos los modelos que se han desarrollado y aplicado en diferentes países, sino servir de breve introducción a los conceptos básicos para la planeación del uso del suelo y el transporte en áreas urbanas.

Dada la complejidad de la problemática que presenta el fenómeno urbano y debido a la fuerte interrelación que existe entre las diferentes variables que conforman el fenómeno; los modelos constituyen un buen instrumento de análisis para la planeación.

El objetivo de los modelos es representar en una forma simbólica la dinámica y características del fenómeno urbano. Así, mediante tal representación

es posible analizar las consecuencias que pueden generar diferentes políticas sobre el uso del suelo y el transporte en un área urbana.

Esto permite contar con elementos de juicio para la toma de decisiones en el proceso de planeación de áreas urbanas. Sin embargo, ésto no quiere decir que los modelos sean el único instrumento válido para la toma de decisiones, sino que constituyen un elemento importante más en el proceso de planeación.

2. CLASES DE MODELOS

Los modelos pueden dividirse en tres clases:

- Descriptivos
- de Predicción y
- de Planeación

2.1 Modelos Descriptivos

Estos modelos pretenden construir una réplica de las características importantes de un medio

urbano existente o de un proceso de crecimiento urbano.

Los modelos descriptivos son de valor científico ya que permiten conocer la estructura del medio urbano, reduciendo la aparente complejidad del medio urbano observado a relaciones matemáticas, que representan la forma en que las variables se interrelacionan.

De tal manera, proveen evidencias concretas acerca de la forma en que las diferentes variables se afectan entre sí, en un área urbana. Pero no proveen información acerca del futuro, ni ayudan en la selección de programas alternativos para el futuro. Para estos propósitos es necesario recurrir a modelos de predicción y de planeación.

2.2 Modelos de Predicción

Para la predicción del futuro es necesario entender la relación entre la forma urbana y su proceso. En un modelo descriptivo es suficiente determinar la relación que existe entre X

y Y en un momento dado, pero cuando el propósito es predecir el valor de Y en un determinado tiempo en el futuro, el modelo debe especificar una secuencia de causa-efecto entre X y Y.

Si se determina la dirección de la "causa", entonces el conocimiento del valor futuro de la "causa" permite predecir el valor futuro de el "efecto".

En la elaboración de un modelo de predicción, lo primero es establecer un marco lógico dentro del cual se definen las variables de la secuencia causa-efecto.

Las variables al final de la secuencia son las llamadas variables "endógenas" y aquellas al principio de la secuencia son las llamadas "exógenas".

El modelo de predicción evalúa las variables endógenas en función de las variables exógenas que constituyen la causa.

Dentro de los modelos de predicción lo más importante para la planeación es la "predicción condicional".

Los modelos de predicción condicional determinan los valores futuros de las variables endógenas en función de una serie de eventos controlados o no controlados representados por los valores de las variables exógenas.

Esta serie de eventos controlados, o no controlados, pueden representar políticas de intervención o supuestos sobre variables fuera del control de la planeación.

Analizando el impacto que cada política causa, mediante el modelo, es posible seleccionar las políticas más apropiadas que hay que establecer en función de las metas de la planeación. Esto constituye precisamente un proceso de evaluación que los modelos de predicción no incluyen, para ello se requeriría un modelo de planeación.

2.3 Modelos de Planeación

Los modelos de planeación necesariamente incorporan la predicción condicional, pero van más allá en lo que concierne a la evaluación de los resultados en función de las metas de la planeación.

Los principales pasos que cubre un modelo de planeación son:

- Especificación de acciones y/o políticas alternativas,
- Predicción de las consecuencias de escoger cada alternativa,
- Evaluación de las consecuencias en función de las metas del proceso de planeación, y
- Selección de las alternativas más apropiadas.

Cabe hacer notar que, los dos primeros pasos corresponden a la "predicción condicional".

Los modelos de planeación más conocidos son los de programación matemática: como los modelos de programación lineal, de programación entera, de programación dinámica, etc.

En general, los modelos descriptivos explican el fenómeno urbano mediante métodos estadísticos, con base en teorías. Los modelos de predicción condicional se basan en teorías y modelos descriptivos para simular el fenómeno urbano observado. Una de las técnicas más usuales en los modelos de predicción condicional para el uso del suelo es la simulación.

En la práctica, ha resultado muy complejo el elaborar modelos de planeación, esto se ha resuelto elaborando modelos de predicción condicional y modelos de evaluación los cuales se utilizan en forma independiente pero secuencial.

3. CARACTERISTICAS DE LOS MODELOS

Una de las características importantes de los modelos es la consideración de la variable tiempo. Los modelos estáticos analizan la estructura urbana en un punto en el tiempo, mientras que los modelos dinámicos consideran cambios en el tiempo.

Otra distinción importante en los modelos es el nivel de agregación de las variables. Existen modelos que se han elaborado con un alto nivel de agregación lo cual permite una visión macro del área urbana, mientras que algunos modelos presentan un nivel de disgregación de las variables que permiten una visión más detallada.

El nivel de agregación de las variables en los modelos depende de los propósitos del modelo y de la disponibilidad de la información existente.

En términos generales, los modelos para uso del suelo consideran las siguientes variables:

- La localización de ciertas actividades en el área urbana, las cuales se establecen fijas. (definición de usos del suelo).

- El sistema de enlace que define los canales de movimiento y comunicación que conectan las actividades que usan el suelo. (Transporte y Comunicación).

- El patrón del comportamiento humano y las relaciones sociales, las cuales determinan y son determinadas por las dos variables anteriores.

Estos modelos son complejos dado que tienen que tomar en cuenta una amplia variedad de diferentes tipos de actividades, gente y sus interrelaciones.

La elaboración de estos modelos debe llenar los siguientes requisitos:

- Contar con todo tipo de información de primera importancia.
- El proceso de simulación debe ser simplificado o generalizado al punto tal que pueda ser comprendido como un todo.
- Tener una clara expresión de la estructura conceptual básica del modelo.
- El modelo debe ser comprensible para las personas que toman las decisiones.

- Debe incorporar información sobre el pasado y el presente para predecir el futuro.

- Debe prestarse a la visualización y entendimiento de diferentes soluciones en el espacio y de políticas alternativas.

Así pues, un modelo debe reflejar en forma apropiada y confiable a la naturaleza del área urbana que representa.

4. MODELOS PARA EL USO DEL SUELO

A partir de los inicios de la década de 1960 se empezaron a realizar grandes esfuerzos en países desarrollados como Estados Unidos e Inglaterra, para desarrollar modelos para la planeación del uso del suelo y el transporte.

Hasta ahora se han desarrollado una amplia gama de modelos para uso del suelo, incluyendo modelos para localización de zonas habitacionales, comerciales, industriales y localización de servicios públicos urbanos.

En estas notas se presenta una breve exposición de dos modelos teórico-descriptivos para uso del suelo habitacional: el modelo de Wingo y el modelo de Alonso.

El desarrollo de estos dos modelos constituyó un avance muy importante ya que presentan los elementos conceptuales básicos y sentaron las bases para el desarrollo de modelos operacionales para uso del suelo habitacional, como el modelo de Herbert-Stevens que también se presenta.

Cabe hacer notar que estos modelos han sido desarrollados en Estados Unidos por lo que los conceptos establecidos no necesariamente son aplicables a la realidad de México. Sin embargo, no es el propósito de estas notas el evaluar su aplicabilidad en el contexto mexicano, sino mostrar los esfuerzos desarrollados en otro país y que puedan servir como un elemento más para un posible inicio de investigación y desarrollo de modelos de planeación urbana en México.

4.1 Modelo de Wingo

Este modelo fué desarrollado por Lowdon Wingo (22) y básicamente es una aplicación de teoría microeconómica al análisis de estructura espacial urbana.

El objetivo del modelo es derivar la distribución de la población y del valor del suelo en el área urbana.

El transporte juega un papel central ya que la distribución de las familias guarda una estrecha relación con las características del transporte urbano. La intensidad del uso del suelo depende de la accesibilidad con que cuenta el suelo; siendo accesibilidad una cualidad relativa que adquiere una parcela de tierra dada su relación con el sistema de transporte que opera a un nivel de servicio específico.

En este modelo se considera que la jornada casa-trabajo es el más importante movimiento de gente en los centros urbanos.

- Análisis económico de la jornada casa-trabajo

Este análisis se basa en que para el trabajador el tiempo consumido en transportarse de su casa al trabajo y viceversa (jornada casa-trabajo) representa un costo. Esto significa que el costo diario de transporte para el trabajador es función del tiempo de transporte y del costo en dinero que depende del medio de transporte utilizado.

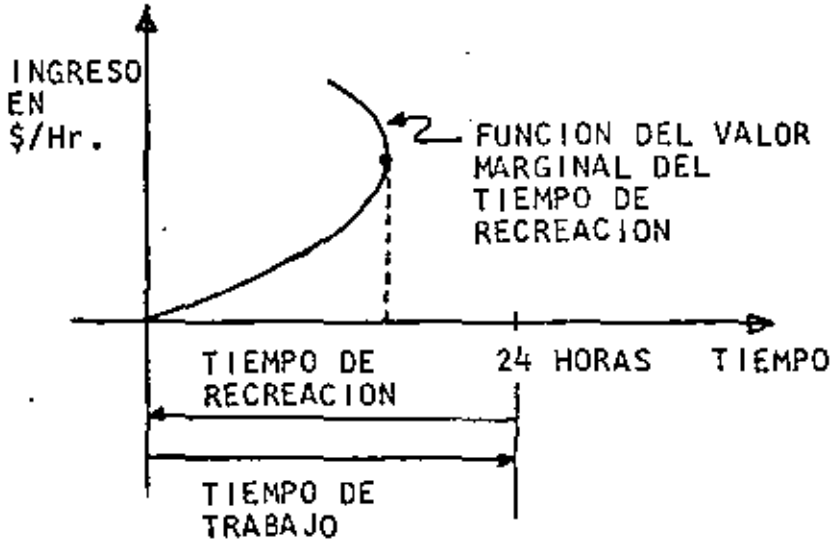
El costo en dinero es fácil de evaluar, el problema reside en evaluar el costo del tiempo de transporte. Para resolver este problema el modelo considera lo siguiente:

. El comportamiento del individuo puede ser descrito en términos de combinaciones de ingreso, que depende del tiempo trabajado, y de tiempo no trabajado (tiempo de recreación).

- Dadas dos alternativas de igual ingreso el individuo escogerá aquella ocupación que consista en menos horas de trabajo.

- La relación importante que hay que definir es la tasa por la cual el individuo sustituye ingreso por tiempo de recreación para mantener un nivel de satisfacción.

Esa relación es el "valor marginal del tiempo de recreación", que se representa por la función que se muestra a continuación:



Para los propósitos de este modelo, en el rango considerado, la función tiene pendiente positiva y es convexa hacia arriba. La función identifica, para cualquier cantidad de tiempo cedida por el trabajador, el valor de la hora marginal que el trabajador cede de su tiempo de recreación.

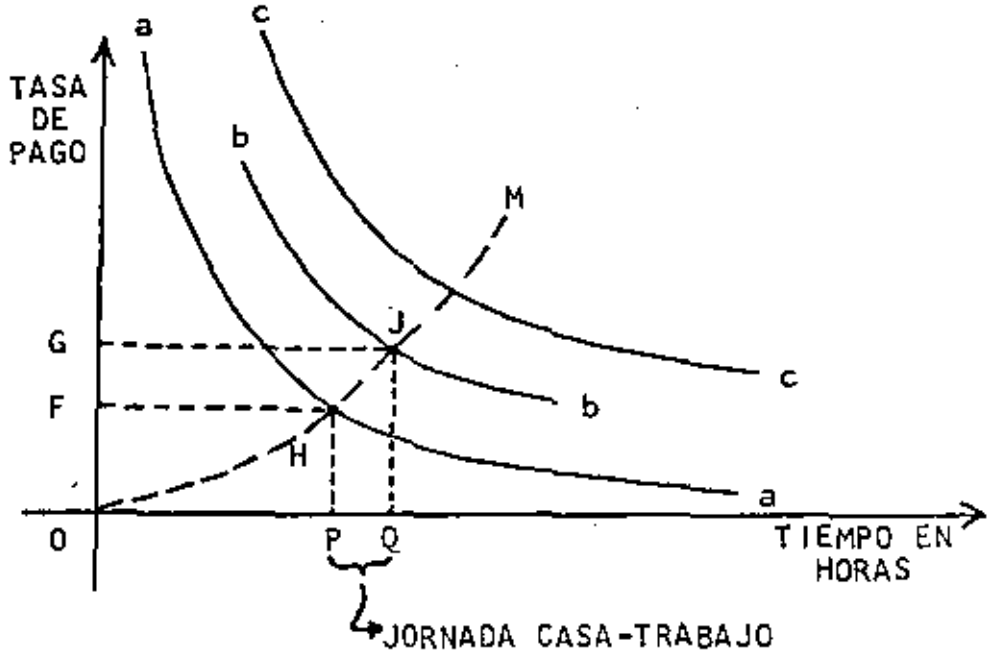
Una de las condiciones para la distribución óptima del trabajo entre las diferentes posibilidades de producción es que, el valor marginal del tiempo de recreación del trabajador sea igual al costo marginal del trabajo para la empresa, esta es la tasa de pago.

Ahora, la teoría del mercado de trabajo establece que la cantidad de trabajo que el trabajador pone en el proceso de producción sea igual a la cantidad de tiempo de recreación que cede.

Sin embargo no sucede así, ya que el trabajador cede más tiempo de recreación que lo que

pone en el proceso de producción, y precisamente la diferencia es el tiempo que el trabajador emplea en transportarse diariamente de su casa al trabajo y viceversa.

Por lo que, de acuerdo a la siguiente gráfica:



- Las curvas aa, bb y cc son curvas de igual ingreso, donde cc es mayor ingreso que bb, y bb mayor que aa.

- La curva OM es la función del valor marginal del tiempo de recreación.

Entonces, si el trabajador trabaja OP horas diarias, obtiene un pago igual a OF que corresponde a un ingreso aa.

Ahora, si el trabajador emplea PQ horas en la jornada diaria casa-trabajo, entonces él cede de su tiempo de recreación un total de OQ horas, lo cual correspondería a un pago de OG que es equivalente a un ingreso mayor, o sea bb. Sin embargo, la empresa le paga al trabajador el ingreso aa, pero de acuerdo al análisis realizado el trabajador debería ganar el ingreso bb.

La diferencia entre el ingreso bb y el ingreso aa representa el costo del tiempo que el trabajador emplea en transportarse durante la jornada casa-trabajo.

Entonces,

$$P. (X.) = W - W' \qquad (1)$$

donde:

$P.(X,)$ = costo del tiempo de transporte.

W = tasa de pago que debería obtener el trabajador

W' = tasa de pago que obtiene el trabajador

Si la ecuación (1) se expresa en función del valor marginal del tiempo de recreación se tiene que,

$$p.(x.) = p.(u + x.) - p.(u) \quad (2)$$

donde:

$p.(x.)$ = costo del tiempo de transporte

$x.$ = el tiempo de transporte

u = el tiempo institucional de horas de trabajo diario (para México jornadas de 8 Hrs.)

$p.$ = función del valor marginal del tiempo de recreación.

Entonces el costo total de transporte para el trabajador es,

$$X = p.(x.) + \sum_a pa^{x}a + \sum_b pb^{x}b \quad (3)$$

donde:

X = costo total de transporte

x_a = distancia de la jornada casa-trabajo

p_a = costo unitario relacionado con la distancia

x_b = número de viajes diarios

p_b = costo unitario por viaje

Una vez determinado el costo de transporte, el modelo distribuye a la población en el espacio urbano.

- <u>Análisis económico del espacio urbano</u>

El modelo establece los siguientes supuestos:

. Se tiene un área urbana en la cual el empleo se encuentra localizado en el centro.

. La población es homogénea en cuanto a ingreso y a preferencias de consumo de suelo para uso habitacional.

- Los precios de todos los productos, excepto el suelo, son constantes a través del área urbana.

- El espacio urbano está económicamente diferenciado por los costos de transporte.

- El valor del suelo o renta es el precio por unidad de suelo multiplicado por la cantidad de suelo consumido.

- Todos los individuos buscan maximizar su ingreso neto.

- Competencia perfecta en el mercado.

Además el modelo necesita tener por conocido lo siguiente:

- La población total.

- La organización y tecnología del transporte.

- El valor marginal del tiempo de recreación de los individuos.

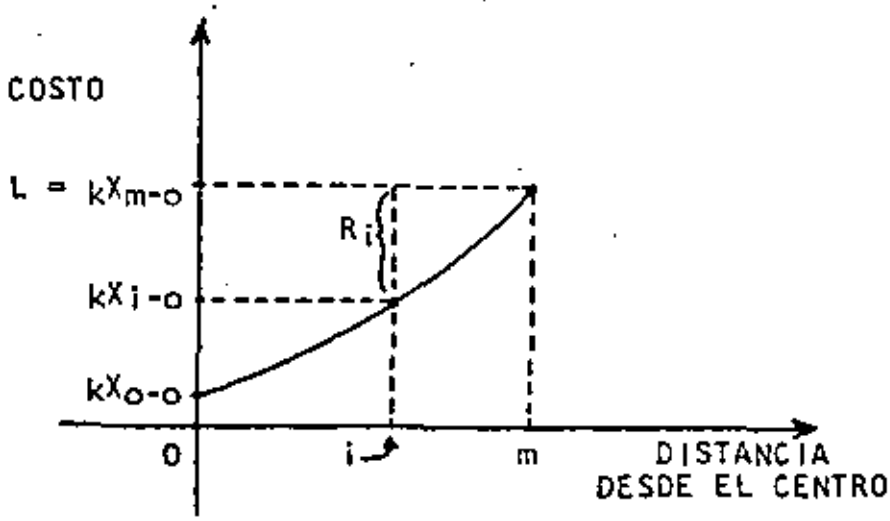
- El valor marginal del suelo (habitacional) de los individuos.

- Total de suelo disponible para uso habitacional.

Entonces,

$X_{k.i-j}$ = costo anual de transporte para el individuo k, de su casa localizada en i a su trabajo localizado en j.

El modelo distribuye a la población con base en la forma en que los costos de transporte afectan la demanda de suelo para uso habitacional. Esto se puede explicar de acuerdo a la siguiente gráfica:



El punto m identifica el punto donde termina el área urbana y el punto 0 el centro del área urbana donde está localizado el empleo. O sea que, un individuo que viva en m, para ir a trabajar incurre en un costo de transporte igual a kX_{m-o}.

En el punto m se supone que la renta del suelo es igual a cero, ya que a partir de ese punto el uso del suelo es predominantemente agrícola.

Otro individuo localizado en i goza de la ventaja en cuanto a costo de transporte (siendo su costo igual a kX_{i-o}) con respecto a otro localizado en m.

Esa ventaja invita a competir al individuo localizado en m por la posición i, dado que el individuo más alejado puede ofrecer una renta por la posición i, igual a la diferencia en costos de transporte.

Entonces el valor del suelo en i o sea la renta Ri es:

$$Ri = kXm\text{-}o - kXi\text{-}o \qquad (4)$$

De la misma forma todos los individuos localizados a una mayor distancia de cualquier posición i (encontrándose i entre 0 y m) pueden ofrecer una renta por la posición i, igual a la diferencia en costos de transporte, generándose una situación competitiva.

Por lo que, en una situación de equilibrio, independientemente de la distancia desde el centro, cada individuo gasta una cantidad constante de dinero en renta más transporte. Tal cantidad constante es el costo de localización en el área urbana y,

$$L = \text{costo de localización} = kXm\text{-}o \qquad (5)$$

entonces se tiene que en equilibrio,

$$L = kXm\text{-}o = Ri + kXi\text{-}o \qquad (6)$$

por lo tanto la estructura espacial del valor del suelo está dada por la siguiente expresión:

$$Ri = L - kXi\text{-}o = kXm\text{-}o - kXi\text{-}o \qquad (7)$$

Así pues, para los individuos localizados en el centro, su costo de transporte es cero por lo que el valor del suelo es muy alto, e igual a kXm-o.

El modelo de Wingo, con base en esa estructura espacial del valor del suelo, finaliza estableciendo relaciones que hacen equivalente la demanda y oferta de suelo para uso habitacional, en el área urbana.

4.2 Modelo de Alonso

Este modelo fue desarrollado por William Alonso (1) con el objeto de derivar el valor del suelo en áreas urbanas. Los resultados de este modelo son similares a los obtenidos por Wingo, sin embargo los modelos presentan una estructura diferente.

Los supuestos básicos de este modelo son:

- Se tiene un área urbana en la que el suelo es homogéneo.

- El empleo se encuentra localizado en el centro del área urbana.

- Existe un mercado libre de suelo y otros bienes y se supone un conocimiento perfecto del mercado por compradores y vendedores.

- Los individuos tratan de maximizar su utilidad.

El modelo, con base en esos supuestos, analiza el equilibrio individual del consumidor de suelo para uso habitacional en términos de teoría microeconómica, y deriva el equilibrio del mercado.

El equilibrio individual del consumidor se basa en que trata de maximizar su utilidad sujeto a la restricción de su presupuesto.

La utilidad del individuo es una función de: la cantidad de suelo que puede adquirir, de la localización del suelo adquirido (identificada por la distancia al centro del área

urbana), y la cantidad de otros bienes que puede adquirir.

Entonces la función de utilidad es:

$$U = u\ (Z,\ q,\ t) \qquad (1)$$

donde:

q = cantidad de suelo para uso habitacional.

t = distancia al centro del área urbana.

Z = cantidad de otros bienes que el individuo necesita. (por ej.: educación, recreación, alimentación, vestido, etc..)

La restricción de presupuesto consiste en la distribución del ingreso del individuo entre los bienes q, t y Z.

Entonces, la restricción de presupuesto es:

$$Y = P(t)\ q + k(t) + p_z Z \qquad (2)$$

donde:

Y = ingreso del individuo.

$P(t)$ = precio del suelo a una distancia t del centro del área urbana.

$k(t)$ = costo de transporte al centro del área urbana, para el individuo que vive a una distancia t del centro.

p_z = precio de los otros bienes (Z).

q, t, Z ya fueron definidos.

Dado que el individuo trata de maximizar su utilidad; para determinar la cantidad de suelo (q) y la localización (t) que el individuo puede adquirir en una situación de equilibrio, el modelo maximiza la función de utilidad sujeta a la restricción de presupuesto.

Esto es:

$$\text{Max} \quad U = u(Z, q, t)$$

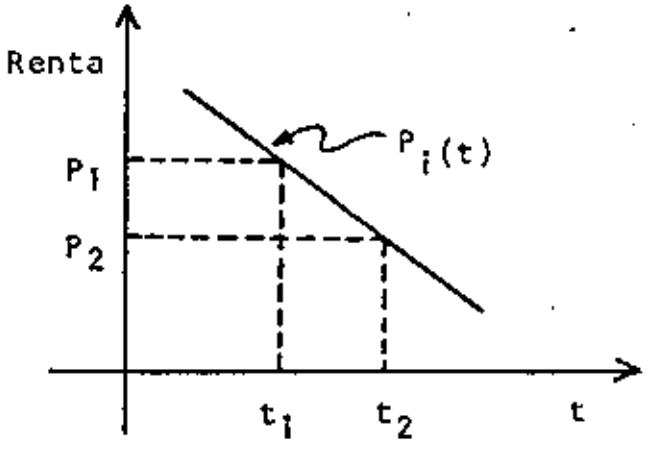
$$\text{sujeto a} \quad Y = P(t)\, q + k(t) + p_z Z$$

La solución de la maximización determina como el individuo sustituye la adquisición de un bien por otro, entre los bienes q, t y Z, dado el patrón de preferencias de consumo el cual está relacionado con el ingreso, el costo de transporte y el precio de otros bienes p_z.

De esa manera, la solución determina el precio competitivo del suelo, o sea la renta, en el área urbana como una función de la distancia t al centro.

Así pues, la función $P_i(t)$ determina el precio competitivo del suelo, para uso habitacional, en cada localización t para los individuos dentro de un mismo estrato de ingreso i.

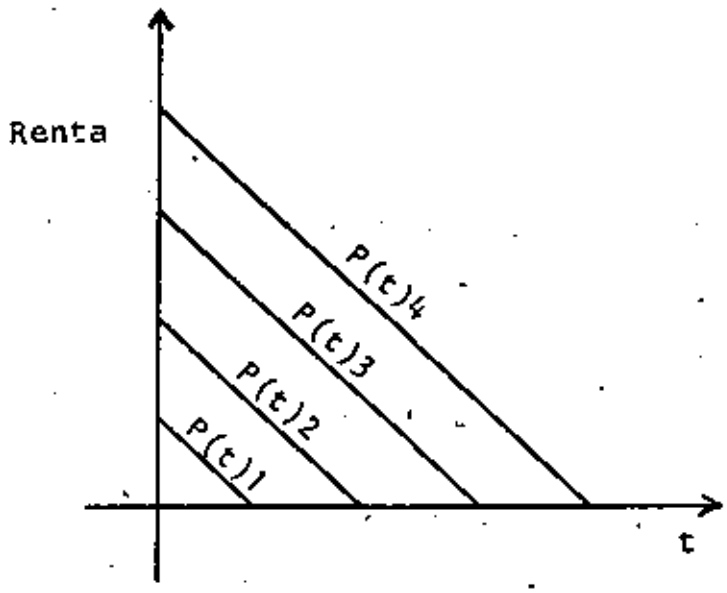
La función $P_i(t)$ es de la siguiente forma:



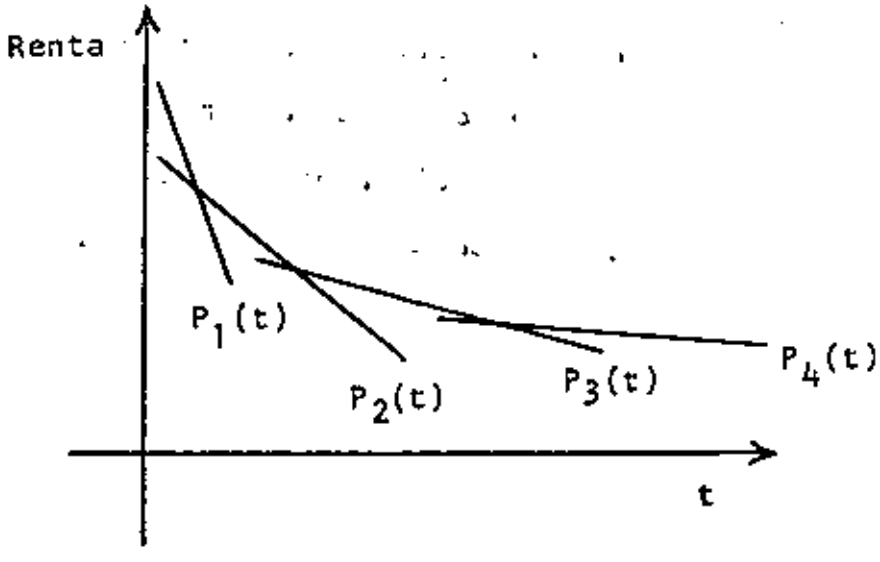
Esto significa que, a diferentes distancias del centro del área urbana los individuos dentro de un mismo estrato de ingreso, pueden ofrecer diferentes precios por m^2 de suelo manteniendo un mismo nivel de utilidad.

La pendiente de la función $P_i(t)$ es negativa por lo que los precios competitivos del suelo son más altos a menores distancias del centro del área urbana. Esto resulta de las oportunidades que tiene el individuo, dado su presupuesto, ya que un ahorro en el costo de transporte permite al individuo ofrecer mayor precio por el suelo.

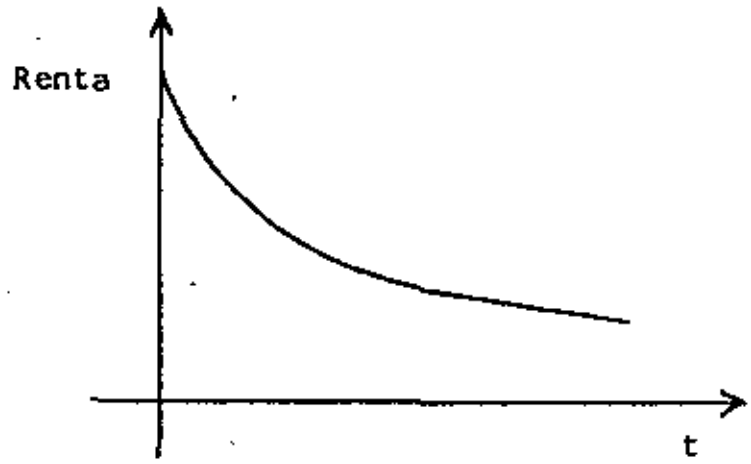
Ahora, un individuo dentro de un estrato de ingreso puede tener diferentes niveles de utilidad, lo cual genera un conjunto de funciones de precio competitivo del suelo, como se observa en la siguiente gráfica:



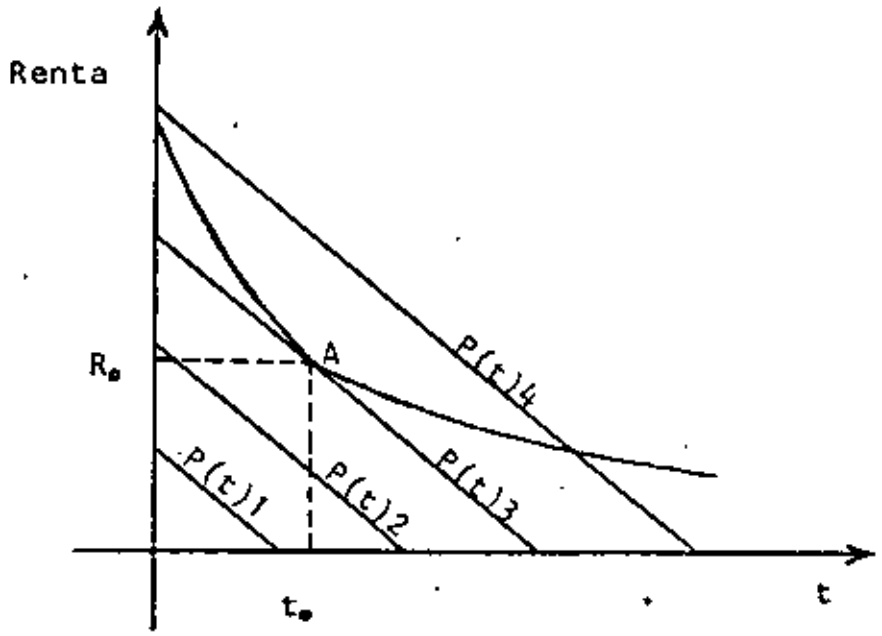
Asimismo, si se consideran diferentes estratos de individuos por ingreso, se generan una serie de funciones $P_i(t)$ como se muestra a continuación:



La curva envolvente de estas curvas, genera una estructura de precios competitivos como resultado de la competencia de los diferentes estratos de población en el área urbana. La estructura de precios es una función que decrece al aumentar la distancia t. La función es de la siguiente forma:



La solución a la maximización planteada anteriormente, es el punto donde se presenta tangencia entre la función de la estructura de precios competitivos y una de las funciones de precio competitivo de un individuo en determinado estrato de ingreso, como se muestra a continuación.



El punto de tangencia A corresponde al punto óptimo, en el cual el individuo del estrato i se encuentra en equilibrio y obtiene un nivel óptimo de utilidad, representado por la función de precio competitivo que es tangente a la estructura de precios, dada la restricción de presupuesto.

Del punto A se determina la localización y la renta de suelo que el individuo en el estrato i puede ofrecer. La cantidad de suelo que el individuo puede obtener a ese precio se determina con base en la ecuación de presupuesto.

De esa forma el modelo de Alonso localiza a todos los individuos, de diferentes estratos, en el área urbana obteniendo un equilibrio en el mercado del suelo para uso habitacional.

4.3 Modelo de Herbert-Stevens

El modelo de Herbert-Stevens fue elaborado por John D. Herbert y Benjamin H. Stevens (7), como parte de un estudio de transporte y uso del suelo que se realizó durante los primeros años de la década 1960-70, para una gran región entre los estados de Pennsylvania y New Jersey en los Estados Unidos de América.

Este modelo, que es operacional, se basa en el modelo teórico-descriptivo de Alonso. Su objetivo es distribuir y asignar familias a suelo habitacional en forma óptima.

El modelo permite tratar un área urbana con varios centros de empleo y varios estratos de población por ingreso, suponiendo que el patrón de preferencias de consumo es similar para todos los individuos en cada estrato.

Los supuestos sobre el comportamiento de los individuos son los mismos que se establecieron en el modelo de Alonso.

En términos generales, el modelo de Herbert-Stevens que es un modelo de programación lineal, genera una asignación óptima de familias a suelo habitacional y al mismo tiempo determina el tipo de vivienda que deberían ocupar, dada la localización de los centros de empleo, la configuración del sistema de transporte y estimaciones de los precios competitivos del suelo.

Para organizar la información necesaria para el modelo, el área urbana se puede subdividir en un número x arbitrario de zonas, de tal manera que cada zona presente características homogéneas.

La información necesaria para el modelo está constituída por las siguientes variables:

U = número de zonas en las que se subdivide el área urbana. Cada una de las

zonas será indicada con el índice $k = 1, 2, \ldots, U$.

n = número de estratos de población. Cada uno de los estratos será indicado con el índice $i = 1, 2, \ldots, n$.

m = número de "paquetes residenciales" disponibles. Un paquete residencial incluye la vivienda y la superficie de suelo utilizado. Los paquetes se diferencian por el costo de construcción de la vivienda y por la superficie de suelo utilizado. Cada paquete será indicado por el índice $h = 1, 2, \ldots, m$.

b_{ih} = presupuesto anual de una familia del estrato i asignado a la compra de un paquete residencial h.

C^k_{ih} = costo anual, de un paquete residencial h localizado en la zona k, para una familia del estrato i. Este costo no incluye el costo del suelo.

S_{ih} = superficie de suelo usado por una familia del estrato i si usa el paquete residencial h.

L^k = superficie de suelo disponible para uso habitacional en la zona k.

N_i = número de familias en el estrato i que van a ser localizadas.

Con base en esta información el modelo determina:

X^k_{ih} = número de familias del estrato i que usan el paquete residencial h localizado en la zona k.

Entonces, la formulación del modelo de programación lineal es la siguiente:

$$\text{Max } Z = \sum_{k=1}^{U} \sum_{i=1}^{n} \sum_{h=1}^{m} X^k_{ih} \; (b_{ih} - C^k_{ih})$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{h=1}^{m} S_{ih} \; X^k_{ih} \leq L^k \; ; \; k = 1,2,..,U$$

$$\sum_{k=1}^{U} \sum_{h=1}^{m} X^k_{ih} = N_i \quad ; \; i = 1,2,..,n$$

$$X^k_{ih} \geqslant 0 \quad ; \text{ para toda } i,h,k$$

La función objetivo Z del modelo indica el valor agregado de los precios competitivos del suelo para toda la población. Ya que la expresión $(b_{ih} - C^k_{ih})$ no es más que el precio competitivo del suelo como lo indica el modelo de Alonso.

El primer conjunto de restricciones prevee que el consumo de suelo en cada zona no sea mayor que el total de suelo disponible para uso habitacional en esa zona.

El segundo grupo de restricciones establece que se localicen, en el área urbana, el número exacto de familias de cada estrato.

El tercer grupo evita que el número de familias localizadas sea negativo.

De las variables que requiere el modelo, la que presenta mayores problemas es la estimación de b_{ih}, que representa el precio que puede ofrecer una familia del estrato i por un paquete residencial h. Sin embargo, existe un método para estimar b_{ih} utilizando datos de encuesta, mediante un análisis de preferencias de consumo basado en funciones de utilidad (21).

Este modelo es aplicable para la toma de decisiones sobre políticas concernientes a zonificación, transporte, desarrollo urbano y vivienda.

5. MODELOS DE TRANSPORTE

El transporte urbano reviste una gran importancia ya que constituye el enlace de las diferentes actividades que se llevan a cabo en los centros urbanos. En la planeación del uso del suelo, el transporte es un factor fundamental.

El objetivo de estos modelos es predecir la demanda de transporte dada una configuración del uso del suelo.

En términos generales, un modelo de transporte se compone de 4 submodelos:

- Generación de Tráfico
- Distribución de Tráfico
- Selección del Medio de Transporte
- Asignación de Tráfico

Las diferencias que presentan los diversos modelos de transporte que se han desarrollado, consisten en la diversidad de métodos en que se basan cada uno de los 4 submodelos.

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los submodelos.

5.1 Generación de Tráfico

Generalmente el área urbana en estudio se subdivide en zonas que presenten características homogéneas.

Las zonas predominantemente habitacionales producen viajes durante la mañana, cuando los residentes se dirigen a su lugar de trabajo. Asimismo, las zonas comerciales o industriales constituyen zonas de atracción de viajes durante ese período del día.

El propósito del submodelo de Generación es predecir el número total de viajes producidos en cada zona y el número total de viajes atraído por cada zona, en cierto período específico del día.

La Generación de Tráfico comunmente se lleva a cabo mediante métodos estadísticos de regresión múltiple.

Así, el número de viajes producidos Oi por cada zona i puede ser considerado como una función lineal de varias (M_i) variables de la zona i ($X^m{}_i$).

Esas variables tratarán de representar el uso del suelo en la zona y las características socioeconómicas de la población residente; ya que de esos factores depende fundamentalmente la producción de viajes.

Entonces, estableciendo la función lineal se tiene que:

$$Oi = \sum_{m=1}^{M1} a_m X^m_i$$

donde Oi es el número de viajes producidos por la zona i y a_m es el coeficiente de cada variable X^m_i.

En forma similar, el número de viajes atraídos Dj para cada zona j puede ser considerado como una función lineal de varias (M_2) variables de la zona j (Y^m_j).

Estableciendo la función lineal se tiene que:

$$Dj = \sum_{m=1}^{M_2} bm\ Y^m_j$$

donde Dj es el número de viajes atraídos por la zona j y bm es el coeficiente de cada variable Y^m_j.

5.2 Distribución de Tráfico

Una vez determinados los Oi y Dj para cada zona, el propósito de este submodelo es predecir el cómo los viajes que son producidos por cada zona son distribuídos entre todas las zonas de atracción.

Generalmente eso se realiza mediante modelos gravitacionales, como el que se muestra a continuación:

$$Tij = K \frac{Oi\ Dj}{f(Cij)}$$

donde:

Tij = fracción del número total de viajes que produce la zona i que son atraídos por la zona j.

Oi = número total de viajes producidos por la zona i.

Dj = número total de viajes atraídos por la zona j.

Cij = costo de transporte de la zona i a la zona j.

$f(Cij)$ = función de impedancia. A mayor costo de transporte entre dos zonas el valor de la función aumenta, lo cual repercute en el modelo disminuyendo el flujo de tráfico entre las dos zonas.

K = factor de calibración del modelo. Este factor asegura que la suma de las fracciones que salen de una zona sea igual al total que sale. Esto es:

$$\sum_{j} Tij = Oi \text{ , para cada zona } i$$

$$\sum_{i} Tij = Dj \text{ , para cada zona } j$$

De esa manera, mediante el modelo gravitacional se estima la matriz de origen y destino, o sea el número de viajes que van de cada zona i a cada zona j.

5.3 Selección del Medio de Transporte

El propósito de este submodelo es distribuir los viajes totales de una zona a otra en diferentes medios de transporte.

Se han desarrollado modelos muy complejos que consideran varios medios de transporte, sin embargo aquí se presenta un método sencillo que considera sólo dos medios.

Este método se basa en resultados empíricos con datos obtenidos de encuesta.

Si se tienen dos medios de transporte, por ejemplo: automóvil y autobuses públicos; lo que se desea estimar es que fracción de los Tij totales van por automóvil y que fracción va por autobús.

Entonces si se tiene que:

T^k_{ij} = número de viajes de la zona i a la zona j que utilizan el medio de transporte k.

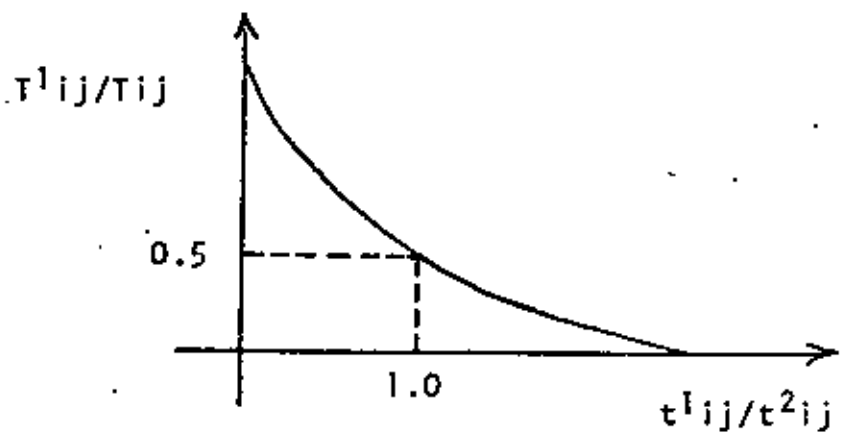
t^k_{ij} = tiempo de recorrido de la zona i a la zona j utilizando el medio de transporte k.

k = 1 si el medio es automóvil.

k = 2 si el medio es autobús.

De la encuesta se obtiene la proporción de los viajes que van por automóvil (T^1ij/Tij) y los tiempos de recorrido t^1ij y t^2ij para cada par de zonas i,j.

Con esa información se elaboran Curvas de Desviación.



La Curva de Desviación es una función del cociente de los tiempos de recorrido por cada medio de transporte

$$C.D. = f\ (t^1ij/t^2ij)$$

Entonces substituyendo el valor encontrado en la Curva de Desviación en la siguiente expresión, se estima el número de viajes que utiliza automóvil, esto es:

$$T^1ij = f(t^1ij/t^2ij)\ Tij$$

El número de viajes que utiliza autobús se determina por la diferencia, esto es:

$$T^2ij = Tij - T^1ij$$

5.4 Asignación de Tráfico

Este submodelo toma los viajes en cada medio de transporte, entre cada par de zonas i, j y los asigna a rutas en la red de transporte que corresponde a cada medio.

Hasta la fecha se han desarrollado una variedad de modelos de asignación de tráfico, algunos de ellos han demostrado ser bastante efectivos.

Aquí se presenta un modelo muy elemental que se basa en el supuesto de que para cada red de transporte correspondiente a cada medio, todos los viajes entre las zonas i, j siguen la ruta de menor costo o menor tiempo de recorrido.

Con base en ese supuesto, se definen los conectores (calles, avenidas, etc.) que conforman las diferentes rutas posibles entre cada par de zonas i, j para el medio de transporte k. De todas las rutas, se selecciona la ruta que implique menor costo o menor tiempo de recorrido entre cada par de zonas i, j.

El total de viajes entre cada par i, j se asigna a todos los conectores que conforman la ruta seleccionada. De esa manera se obtiene el flujo de tráfico en cada conector de la red correspondiente al medio de transporte.

Este procedimiento se realiza para cada red de transporte correspondiente a cada medio, en forma independiente.

En esta sección se ha descrito un modelo de transporte muy elemental, en el cual se cubrieron los elementos básicos para la estimación de la demanda de transporte.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

(1) Alonso, William. "Location and Land Use" Harvard University Press, 1964.

(2) Goldner, William "The Lowry Model Heritage" JAIP, Marzo 1971.

(3) Harris, Britton "New Tools for Planning" JAIP, Mayo 1965.

(4) Harris, Britton "The Uses of Theory in the Simulation of Urban Phenomena" JAIP Vol. 32, No. 5, 1966.

(5) Harris, Britton "Quantitative Models of Urban Development: Their Role in Metropolitan Policy-Making" en Issues in Urban Economics editado por Perloff y Wingo, The Johns Hopkins Press, 1968.

(6) Harris, Britton "Change and Equilibrium in the Urban System" en Systems Approach and the City, editado por Mesarovic y Reisman, North-Holland, 1972.

(7) Herbert, John y Stevens, Benjamin H. "A Model for the Distribution of Residential Activities in Urban Areas" Journal of Regional Science, Vol. 2, 1960.

(8) Hill, D.M. "A Growth Allocation Model for the Boston Region" JAIP, Mayo 1965.

(9) Lakshmanan T.R. y Hansen, W.G. "A Retail Market Potential Model" JAIP, Mayo 1965.

(10) Lathrop, George, "An Opportunity-Accessibility Model for Allocating Regional Growth" JAIP, Mayo 1965.

(11) Lowry, Ira S. "A Model of Metropolis" Memo RM-4035-RC Rand Corporation, 1964.

(12) Lowry, Ira S. "A Short Course in Model Design" JAIP, Mayo 1965.

(13) Lowry, Ira S. "Seven Models of Urban Development: A Structural Comparison" Highway Research Board, Special Report # 97, 1968.

(14) Mills, Edgar S. "Studies in the Structure of the Urban Economy" Resources for the Future, Inc. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1972.

(15) Muth, Richard F. "Cities and Housing" The University of Chicago Press, Chicago 1969.

(16) Potts, R.B. y Oliver, R.M. "Flows in Transportation Networks"
Academic Press, 1972.

(17) Putman, Stephen H. "Intra-Urban Employment Forecasting Models: A Review and a New Model Construct"
JAIP, Julio 1972.

(18) Putman, Stephen H. "Urban Land Use and Transportation Models: A State of the Art Summary", Transportation Research, Vol. 9, 1975.

(19) Steenbrink, P.A. "Optimization of Transport Networks" John Wiley and Sons, 1974.

(20) Stegman, Michael "Accessibility Models and Residential Location"
JAIP, Enero 1969.

(21) Wheaton, W. y Harris, B. "Linear Programming and Residential Location: The Herbert-Stevens model revisited".
University of Pennsylvania, Dept. of City and Regional Planning Philadelphia, 1970.

(22) Wilson, Alan G. "Urban and Regional Models in Geography and Planning"
John Wiley and Sons, 1974.

(23) Wingo, Lowdon "Transportation and Urban Land"
Resources for the Future, Inc.
Washington D.C. 1961.

NOTA: JAIP = Journal of the American Institute of Planners.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

A NUMERICAL EXAMPLE

M. EN I. FERNANDO SCHUTZ ESTRADA

NOVIEMBRE, 1980

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

problems studied in this chapter. We shall defer until the next chapter the study of cases with more than a single state parameter, or more than a single control variable to be selected at each stage. Equation (10-28) can be given an interesting physical interpretation, which is really the basis for the existence of the recurrence relations that are involved in the solution of a problem by dynamic programming. It says that we cannot have an optimal value of the objective function for k stages unless for any $\mathbf{x}_k$ selected for stage k, the value of the objective function for the remaining $k-1$ stages is optimal, given the $\mathbf{x}_k$ selected for stage k. Bellman [3] refers to this statement as the *principle of optimality*. It can be used to obtain directly the recurrence relations involving the state functions. In general, we shall not obtain the recurrence relations in this manner, but will derive them from the definitions of the state functions.

The general description of the characteristics of dynamic programming and the sorts of problems which can be formulated in the format of dynamic programming must necessarily be very general and somewhat vague, since there exists an immense variety of widely different types of problems which can be formulated as dynamic programming problems. It is only by studying a number of examples that one obtains a better understanding of the structure of dynamic programming. We shall do this in the remainder of the present chapter and in the next chapter. In the course of formulating a problem as a dynamic programming problem, it is usually easy to recognize the n-stage structure. Probably the most subtle task is to select the state parameters. Once this is accomplished, it is usually straightforward to obtain the recurrence relations.

10-5 A numerical example. Let us work out a greatly simplified example of the stocking of a submarine with spare parts. We shall imagine that there are only three parts to be stocked and that these have unit volumes of 1, 2, and 2 ft^3, respectively. A total of 10 ft^3 of storage space is available. The stockout costs π_j are \$800, \$600, and \$1300, respectively. It will be imagined that the demand for each spare part has a Poisson distribution and that the means are 4, 2, and 1, respectively. We wish to determine how many of each spare part should be stocked so as to minimize the expected stockout cost while not exceeding the storage space available.

In mathematical terms, we wish to determine non-negative integers x_1, x_2, x_3 which minimize

$$z = \sum_{j=1}^{3}\left[\pi_j \sum_{v_j=x_j}^{\infty} (v_j - x_j)p(v_j;\mu_j)\right] \tag{10-29}$$

while satisfying

$$x_1 + 2x_2 + 2x_3 \le 10.$$

In the objective function,

$$p(v_j;\mu_j) = \frac{\mu_j^{v_j}}{v_j!}e^{-\mu_j} \tag{10-30}$$

is the Poisson density function, and μ_j is the expected demand for item j. From (10-30), note that

$$v_j p(v_j;\mu_j) = \mu_j p(v_j - 1;\mu_j), \qquad v_j \ge 1.$$

Thus we can write

$$\sum_{v_j=x_j}^{\infty} (v_j - x_j)p(v_j;\mu_j) = \begin{cases} \mu_j P(x_j - 1;\mu_j) - x_j P(x_j;\mu_j), & x_j \ge 1, \\ \mu_j, & x_j = 0, \end{cases} \tag{10-31}$$

where

$$P(x_j;\mu_j) = \sum_{v_j=x_j}^{\infty} p(v_j;\mu_j)$$

is the complementary cumulative function. Equation (10-31) makes it easy to evaluate the expected number of demands for item j occurring when the system is out of stock on j, since the complementary cumulative function for the Poisson distribution is tabulated in tables such as those given in [14]. Let

$$\Lambda_k(\xi) = \min_{x_1,\ldots,x_k} \sum_{j=1}^{k} \pi_j[\mu_j P(x_j - 1;\mu_j) - x_j P(x_j;\mu_j)], \tag{10-32}$$

where the minimization is carried out over non-negative integers satisfying $\sum_{j=1}^{k} a_j x_j \le \xi$ when a_j is the unit volume of x_j. Then $z^* = \Lambda_3(10)$.

If the suggestion of the text in Section 10-2 were followed, we would tabulate Λ_1, Λ_2 for all $\xi = 0, 1, \ldots, 10$. To save computational effort we have constructed an example where it is only necessary to tabulate Λ_1, Λ_2 for even ξ. To see this, note that x_3 can take on the values 0, 1, ..., 5; thus to compute $\Lambda_3(10)$, we need Λ_2 for $\xi = 10$ ($x_3 = 0$), 8, 6, 4, 2, 0 ($x_3 = 5$). However, to evaluate $\Lambda_2(\xi)$, we need Λ_1 for all $\xi - 2x_2$, $x_2 = 0, 1, \ldots, [\xi/2]$, that is, since $\Lambda_2(\xi)$ is needed only for even ξ, $\Lambda_1(\xi)$ is also needed for even ξ.

To evaluate $\Lambda_1(\xi)$, no minimization needs to be carried out, because the stockout cost for item 1 will be minimized by stocking as many units of item 1 as possible. Thus

$$\Lambda_1(\xi) = 800[4P(\xi - 1;4) - \xi P(\xi;4)]; \qquad x_1(\xi) = \xi.$$

The values of $\Lambda_1(\xi)$ and $x_1(\xi)$ are given in Table 10-2. For example

$$\Lambda_1(6) = 800[4P(5;4) - 6P(6;4)] = 800[4(0.3712) - 6(0.2149)]$$
$$= \$156.32.$$

TABLE 10-2

ξ	$\Lambda_1(\xi)$	$\hat{x}_1(\xi)$	$\Lambda_2(\xi)$	$\hat{x}_2(\xi)$
0	3200	0	4400	0
2	1688	2	2888	0
4	625.3	4	1825.3	0
6	156.32	6	1306.5	1
8	26.91	8	637.5	1
10	3.30	10	481.1	2

To compute Λ_2, Λ_3 we use the recurrence relation

$$\Lambda_k(\xi) = \min_{0 \le x_k \le \mathrm{Int}(\xi/a_k)} \{\pi_k[\mu_k P(x_k - 1; \mu_k) - x_k P(x_k; \mu_k)] + \Lambda_{k-1}(\xi - a_k x_k)\}, \qquad k = 2, 3. \tag{10-33}$$

Let us illustrate with the computation of $\Lambda_2(8)$. For $\xi = 8$, x_2 can take on the values 0, 1, 2, 3, 4. For each of these values, we compute

$$\Omega_2(x_2; 8) = 600[2P(x_2 - 1; 2) - x_2 P(x_2; 2)] + \Lambda_1(8 - 2x_2),$$

and Λ_2 is the smallest of these. Before computing any of the $\Lambda_2(\xi)$, one should compute $600[2P(x_2 - 1; 2) - x_2 P(x_2; 2)]$ for $x_2 = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ since all these values will be used in determining the various $\Lambda_2(\xi)$. For the case under consideration, we find that $\Omega_2(0; 8) = 1226.9$, $\Omega_2(1; 8) = 837.5$, $\Omega_2(2; 8) = 950.1$. It is not necessary to evaluate $\Omega_2(3; 8)$, $\Omega_2(4; 8)$, since they are clearly greater than $\Omega_2(2; 8)$. Note that

$$\Omega_2(1; 8) = 681.2 + \Lambda_1(6) = 681.2 + 156.3 = 837.5 = \Lambda_2(8).$$

It remains to evaluate $\Lambda_3(10)$. For $\Omega_3(x_3; 10)$, we find $\Omega_3(0; 10) = 1781.1$, $\Omega_3(1; 10) = 1315.8$, $\Omega_3(2; 10) = 1441.3$. It is unnecessary to compute $\Omega_3(4; 10)$, $\Omega_3(5; 10)$, since they are greater than $\Omega_3(2; 10)$. Thus $z^* = \Lambda_3(10) = \Omega_3(1; 10) = \$1315.8$ and $x_3^* = 1$. To compute x_2^* and x_1^*, we note that

$$x_2^* = \hat{x}_2(10 - 2) = \hat{x}_2(8) = 1; \quad x_1^* = \hat{x}_1(10 - 2 - 2) = \hat{x}_1(6) = 6.$$

The unique optimal solution to the problem is then $x_1^* = 6$, $x_2^* = 1$, $x_3^* = 1$, with the minimum expected stockout cost being \$1315.8.

10-6 Some other practical examples. In this section we shall give three other examples of problems of the mathematical form (10-1) which can be encountered in practice.

(1) *Cargo-loading problems.* Let us assume that n different items are available for loading on a vessel of limited volume b. The unit volume and unit value of item j will be denoted by a_j and p_j, respectively. We wish to determine the number of units, x_j, of each product that should be loaded on the vessel in order to maximize the value of the cargo. Mathematically, we wish to determine non-negative integers x_j which satisfy

$$\sum_{j=1}^{n} a_j x_j \le b$$

and maximize

$$z = \sum_{j=1}^{n} p_j x_j.$$

This is the simplest type of problem of the form (10-1), since the $f_j(x_j) = p_j x_j$ are linear in the x_j. The cargo-loading problem can also be considered an integer linear programming problem.

(2) *Allocation of a procurement to a number of warehouses.* Consider a large inventory system which consists of a number n of warehouses located all over the continental United States. Periodically, a certain item stocked by the warehouses is ordered from its manufacturer. Imagine that the warehouses do not place orders individually, but that ordering is done centrally for all warehouses at the same time. Suppose that a quantity Q has been ordered from the manufacturer on some particular occasion. There will be a lead time between the date at which the order is placed and the date at which it is ready to be shipped to the various warehouses. When the order is ready to be shipped, it is necessary to decide how the Q units will be allocated among the n warehouses. For simplicity, it will be imagined that warehouses will not receive any further shipment of the product under consideration for a time period of length T, i.e., until the next procurement is made. The units are to be allocated to the warehouses in a way that will minimize the sum of transportation costs plus expected stockout costs in the period preceding the next procurement.

Let $C_j(x_j)$ be the cost of transporting x_j units from the factory to warehouse j, y_j the on-hand inventory of the product at warehouse j at the time the allocation is made, π_j the cost incurred for each unit demanded when warehouse j is out of stock, and $p_j(v_j)$ the probability that v_j units will be demanded at warehouse j in a time T. Then, ignoring the transportation time, we find that the cost of transportation to warehouse j plus expected stockout costs at j if x_j units are shipped to j is

$$f_j(x_j) = C_j(x_j) + \pi_j \sum_{v_j = y_j + x_j}^{\infty} (v_j - y_j - x_j) p_j(v_j). \tag{10-34}$$

Thus we wish to determine non-negative integers x_j satisfying

$$\sum_{j=1}^{n} x_j = Q,$$

and minimizing

$$z = \sum_{j=1}^{n} f_j(x_j),$$

where $f_j(x_j)$ is given by (10-34). When solving this problem it is at times possible to use various computational shortcuts. For example, it might be known *a priori* that it would not be optimal to ship more than $Q/3$ to any given warehouse. In this case, one would not need to evaluate the $f_j(x_j)$ for $x_j > Q/3$; furthermore, if $\xi > Q/3$, the search over $\Omega_k(x_k; \xi)$ to determine $\Lambda_k(\xi)$ would not need to be carried beyond $x_k = Q/3$. Also $\Lambda_1(\xi)$ and $\Lambda_2(\xi)$ must be tabulated only up to $\xi = Q/3$ and $\xi = 2Q/3$, respectively. Moreover, packaging and shipment specifications may simplify matters further. For example, there may be a certain minimum package size, and it may be stipulated that shipments must be made in integral multiples of this size; or there may be some rule stating that up to 25 units, any number can be shipped, whereas from 25 to 100 units only multiples of 5 units and for over 100 units only multiples of 10 units are to be shipped.

(3) *Allocation of tolerances.* Consider some product which is assembled from n pieces. Associated with each of the n pieces is some measurable characteristic which may be a physical dimension, electrical resistance, etc. Denote by x_j the value of the characteristic for piece j. There is also a measurable characteristic associated with the final product, which is perhaps an overall dimension or a voltage. Let y be the value of this characteristic. Then imagine that y is related to the x_j by the function $y = g(x_1, \ldots, x_n)$. If y is measured on a number of different assembled units it will be found that y varies somewhat from one unit to the next, and really behaves like a random variable. The reason for this is that the x_j must themselves be considered to be random variables, for example, the dimension of part j used in the assembly must be considered to be a random variable. Let μ_j be the expected value of x_j. We shall suppose that the deviations of x_j from μ_j are not large.

By Taylor's theorem we can write approximately

$$y = g(x_1, \ldots, x_n) = g(\mu_1, \ldots, \mu_n) + \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{\partial g}{\partial x_j}\right)_0 (x_j - \mu_j), \qquad (10\text{-}35)$$

where $(\partial g/\partial x_j)_0$ is $\partial g/\partial x_j$ evaluated at $\mu_1, \ldots, \mu_n$. Taking the expected value of y, we see from (10-35) that the expected value μ_y satisfies

$$\mu_y = g(\mu_1, \ldots, \mu_n). \qquad (10\text{-}36)$$

Let us now imagine that the x_j are independent random variables. Then from (10-35) we see that σ_y^2, the variance of y, is

$$\sigma_y^2 = \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{\partial g}{\partial x_j}\right)_0^2 \sigma_j^2, \qquad (10\text{-}37)$$

where σ_j^2 is the variance of x_j.

Assume that for an assembled unit to pass inspection, y must lie in the interval $y_1 \le y \le y_2$. Assume also that y is essentially normally distributed with its mean given by (10-36). The probability that y lies outside the interval $y_1 \le y \le y_2$ will then be the long-run fraction of the assembled units that will be classified as defective and will not pass inspection. Once μ_y and the long-run fraction defective are specified, σ_y^2 is determined. The value of σ_y^2 is, of course, determined in turn by the values of the σ_j^2. Now assume that the μ_j are chosen so that $\mu_y = (y_1 + y_2)/2$. Then for any given σ_y^2, the long-run fraction defective is minimized. However, the long-run fraction defective will depend on σ_y^2 and will decrease as σ_y^2 is decreased. Let us suppose that within limits, we can make σ_j^2 as low as desired, but that the installed cost of part j increases as σ_j^2 is decreased. We shall imagine that the σ_j^2 can be assigned only discrete values (say, 1 or 5 per cent resistors), and, if x_j has a variance of σ_j^2, the installed cost of part j is $f_j(\sigma_j^2)$. There may not be any combination of σ_j^2 which yields σ_y^2 exactly when σ_y^2 is specified so as to yield a given long-run fraction defective. Suppose, however, that we would like to determine the minimum cost of the assembled unit as a function of the long-run fraction defective. Specification of the fraction defective f determines σ_y^2, and for this σ_y^2, the σ_j^2 which minimize the cost are the $\sigma_j^2 \ge 0$ satisfying

$$\begin{aligned} &\sum_{j=1}^{n} \left(\frac{\partial g}{\partial x_j}\right)_0^2 \sigma_j^2 \le \sigma_y^2, \\ &\min z = \sum_{j=1}^{n} f_j(\sigma_j^2), \end{aligned} \qquad (10\text{-}38)$$

which is of the form (10-1) in the variables σ_j^2.

The computational scheme introduced in Section 10-2 makes it very easy to trace out a sequence of optimal solutions as b is changed. All that is required is that at the last stage, $\Lambda_n(\xi)$ is evaluated for all the b-values of interest, not merely a single b-value. Hence very little additional computational effort is needed to study how z^* and the x_j^* change as b is changed. Of course, in making the computation, one would evaluate all the $\Lambda_k(\xi)$, $k = 1, \ldots, n-1$, for all integers ξ up to the largest b that was of interest. Consequently, it would be quite easy to generate the curve giving the minimum cost of the assembled unit as a function of the long-run fraction defective. This is the curve we wanted.

introduites par les bornes des variables de décision d'une phase aux phases suivantes. Pour que le lecteur puisse s'en convaincre, nous lui laissons, à titre d'exercice, le soin de reprendre le présent problème dans le cas où $S = 20$, il trouvera :

13.72 $$x^* = [20, 12, 12, 9, 7, 4],$$

13.73 $$a^* = [18, 0, 5, 0, 0, 4],$$

avec

13.74 $$F^* = 303 - (1).$$

Dans certains problèmes, il est possible d'obtenir rapidement une solution optimale par un raisonnement intuitif ; c'est le cas, par exemple, pour le présent problème où l'on fait $S = 20$ (1). La méthode de programmation dynamique n'est pas toujours la plus facile, mais elle présente un caractère très général.

→ (52)

Section 14

DÉCISIONS EN AVENIR ALÉATOIRE

1. *Etude d'un jeu de hasard.* — 2. *Stratégies optimales.*

1. Etude d'un jeu de hasard.

Pour mettre en évidence la façon dont la programmation dynamique peut être appliquée dans le cas d'un avenir aléatoire, nous proposons au lecteur le jeu de hasard suivant.

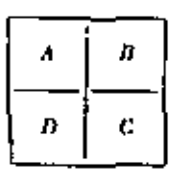


Fig. 14.1

On considère quatre cases (figure 14.1) numérotées A, B, C et D. Le jeu se décomposera en 1 phase préalable suivie de 3 phases. On donnera au joueur un jeton à placer dans une case.

(1) Toutes ces difficultés s'évanouissent si le problème peut être traité avec *des variables à valeurs discrètes*, sous réserve que chaque variable soit dotée d'un nombre de valeurs discrètes acceptables pour le moyen de calcul (manuel ou électronique) dont on dispose. On est alors ramené à un problème de recherche d'un chemin optimal comme dans le problème présenté à la section 11.

Phase 0.

On indique au joueur dans quelle case son jeton se trouve initialement.

Phase I.

Etant initialement dans une certaine case, le joueur peut se déplacer selon les flèches pointillées indiquées sur la figure (14.2). Ainsi, étant initialement en B il peut aller en A, en B ou en D.

Ce mouvement étant réalisé, le hasard intervient, une roue de loterie appropriée renvoie le jeton dans une autre case selon les différentes lois de probabilité indiquées dans la colonne « hasard » de la phase I. Ainsi, après la décision, le jeton étant en D, les trois événements suivants peuvent se produire : il va en A avec un gain de 3 et une probabilité de 0,5 ; en C avec un gain de 2 et une probabilité de 0,3 ou en D avec un gain de 1 et une probabilité de 0,2.

Phase II.

Même processus, mais l'ensemble des décisions autorisées est différent ainsi que les gains et lois de probabilité.

Phase III.

Encore le même processus, mais avec un ensemble de décisions autorisées, de gains et probabilités différents.

Le jeu se termine en phase III et on calcule le gain total pour les trois phases.

On se propose de déterminer l'*espérance mathématique optimale du gain* ; c'est-à-dire *la stratégie* (1) (ou les stratégies) donnant l'espérance mathématique maximale du gain.

Pour traiter ce problème par la programmation dynamique, nous considérerons les 3 « variables » y_1, y_2, y_3 qui peuvent être égales à A, B, C ou D et représentent une décision du joueur dans les phases successives I, II, III ; nous appellerons x_1, x_2, x_3, x_4 les « variables » de positions qui peuvent être égales à A, B, C, D au début des phases I, II et III et à la fin de la phase III : la figure (14.2) montre à quels instants il faut considérer ces différentes variables.

(1) Face au hasard, il convient de remplacer le mot « politique » par le mot « *stratégie* » ; il s'agit d'un ensemble de décisions prises en vue de faire face à toutes les éventualités.

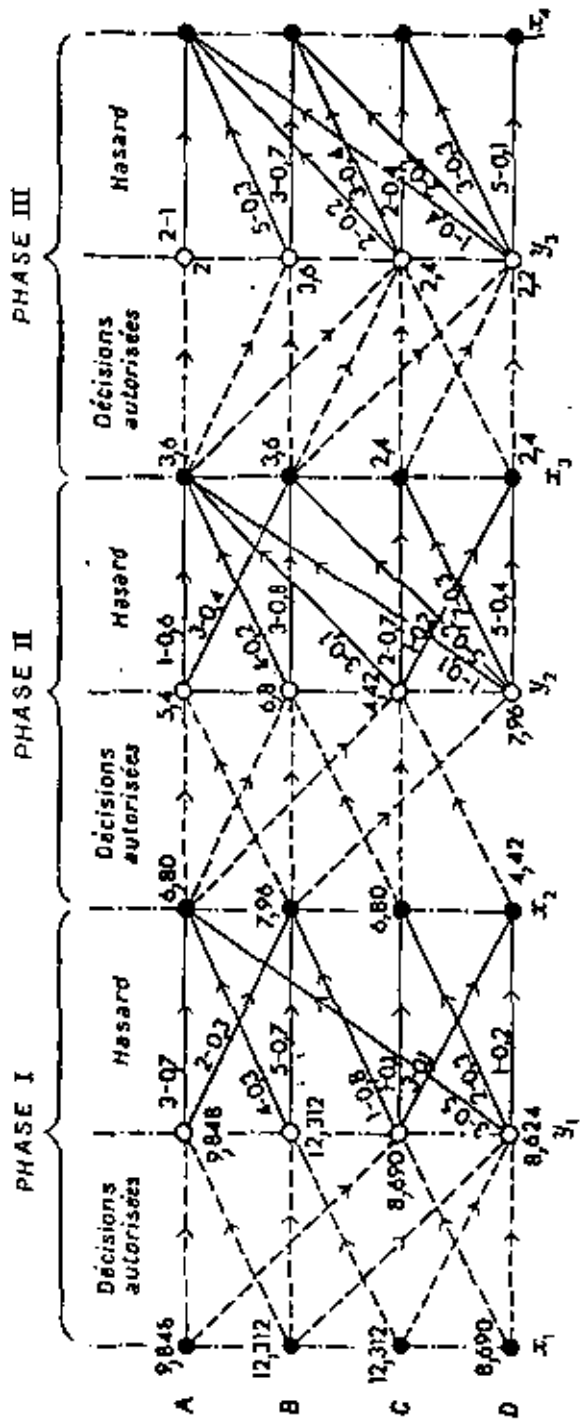


FIG. 14.2. — Présentation des stratégies optimales.

Les nombres indiqués sur les arcs représentent la valeur de la transition suivie de sa probabilité ; les nombres dans les colonnes y_i représentent les espérances mathématiques ramenées à la date i après la décision prise à cette date ; les nombres dans les colonnes x_i représentent les espérances mathématiques optimales ramenées à la date i.

Phase III.

Appelons $\bar{z}_3(x_3, y_3)$ l'espérance mathématique du gain quand, étant en x_3, on décide d'aller en y_3. En fait, cette quantité ne dépend que de y_3 ; on a :

$$\bar{z}_3(A, A) = (2)\,(1) = 2\,,$$

$$\bar{z}_3(A, B) = \bar{z}_3(B, B) = (5)\,(0{,}3) + (3)\,(0{,}7) = 3{,}6\,,$$

$$\bar{z}_3(A, C) = \bar{z}_3(B, C) = \bar{z}_3(C, C) = \bar{z}_3(D, C)$$

14.1 $$= (2)\,(0{,}2) + (3)\,(0{,}4) + (2)\,(0{,}4) = 2{,}4\,,$$

$$\bar{z}_3(B, D) = \bar{z}_3(C, D) = \bar{z}_3(D, D)$$

$$= (1)\,(0{,}4) + (2)\,(0{,}2) + (3)\,(0{,}3) + (5)\,(0{,}1) = 2{,}2\,.$$

En appelant $f_3(x_3)$ l'espérance mathématique maximale quand on est en x_3, il vient :

$$f_3(A) = 3{,}6\,, \quad \text{avec } y_3 = B\,;$$

$$f_3(B) = 3{,}6\,, \quad \text{avec } y_3 = B\,;$$

14.2 $$f_3(C) = 2{,}4\,, \quad \text{avec } y_3 = C\,;$$

$$f_3(D) = 2{,}4\,, \quad \text{avec } y_3 = C\,.$$

Phases III et II ensemble.

Appelons $\bar{z}_2(x_2, y_2)$ l'espérance mathématique du gain pour les phases II et III réunies quand on est en x_2 au début de la phase II. Nous appliquerons le théorème d'optimalité, en faisant la somme des espérances mathématiques du gain en phase II et du gain maximal en phase III pour les valeurs considérées de x_2, y_2 et x_3 ; les espérances mathématiques optimales sont données par (14.4).

Il vient.

$$\bar{z}_2(A, A) = \bar{z}_2(B, A) = (1 + 3{,}6)\,(0{,}6) + (3 + 3{,}6)\,(0{,}4) = 5{,}40\,,$$

$$\bar{z}_2(A, B) = \bar{z}_2(B, B) = \bar{z}_2(C, B)$$

$$= (4 + 3{,}6)\,(0{,}2) + (3 + 3{,}6)\,(0{,}8) = 6{,}80\,,$$

$$\bar{z}_2(A, C) = \bar{z}_2(B, C) = \bar{z}_2(C, C) = \bar{z}_2(D, C)$$
$$= (3 + 3{,}6)\,(0{,}1) + (2 + 2{,}4)\,(0{,}7)$$
14.3 $$+ (1 + 2{,}4)\,(0{,}2) = 4{,}42\,,$$
$$\bar{z}_2(B, D) = (1 + 3{,}6)\,(0{,}1) + (5 + 3{,}6)\,(0{,}2)$$
$$+ (7 + 2{,}4)\,(0{,}3)$$
$$+ (5 + 2{,}4)\,(0{,}4) = 7{,}96\,.$$

En appelant $f_{2,2}(x_2)$ l'espérance mathématique maximale quand on est en x_2, il vient :

$$f_{2,2}(A) = 6{,}80\,, \quad \text{avec } y_2 = B\,;$$
$$f_{2,2}(B) = 7{,}96\,, \quad \text{avec } y_2 = D\,;$$
14.4 $$f_{22}(C) = 6{,}80\,, \quad \text{avec } y_2 = B\,;$$
$$f_{22}(D) = 4{,}42\,, \quad \text{avec } y_2 = C\,.$$

Phases III, II et I ensemble

Appelons $\bar{z}_1(x_1, y_1)$ l'espérance mathématique du gain pour les phases III, II et I réunies quand on est en x_1 au début de la phase I. On appliquera encore le théorème d'optimalité de la même manière que précédemment.

Il vient :

$$\bar{z}_1(A, A) = \bar{z}_1(B, A)$$
$$= (3 + 6{,}80)\,(0{,}7) + (2 + 7{,}96)\,(0{,}3) = 9{,}848\,,$$
$$\bar{z}_1(B, B) = \bar{z}_1(C, B)$$
14.5 $$= (4 + 6{,}80)\,(0{,}3) + (5 + 7{,}96)\,(0{,}7) = 12{,}312\,,$$
$$\bar{z}_1(A, C) = \bar{z}_1(D, C)$$
$$= (1 + 7{,}96)\,(0{,}8) + (1 + 6{,}80)\,(0{,}1)$$
$$+ (3 + 4{,}42)\,(0{,}1) = 8{,}690\,,$$

$$\bar{z}_1(B, D) = \bar{z}_1(C, D) = \bar{z}_1(D, D)$$
$$= (3 + 6{,}80)\,(0{,}5) + (2 + 6{,}80)\,(0{,}3)$$
$$+ (1 + 4{,}42)\,(0{,}2) = 8{,}624\,.$$

On aura finalement, pour les différentes valeurs de y_1, en appelant $F_{max}(x_1)$ la valeur maximale :

$$x_1 = A,\ F_{max}(A) = 9{,}848\,, \quad \text{avec } y_1^* = A\,;$$
$$x_1 = B,\ F_{max}(B) = 12{,}312\,, \quad \text{avec } y_1^* = B\,;$$
14.6 $$x_1 = C,\ F_{max}(C) = 12{,}312\,, \quad \text{avec } y_1^* = B\,;$$
$$x_1 = D,\ F_{max}(D) = 8{,}690\,, \quad \text{avec } y_1^* = C\,.$$

2. Stratégies optimales.

On obtiendrait les valeurs maximales ci-dessus comme valeurs moyennes, en répétant le jeu un nombre de fois suffisant (on pourrait admettre que pour 100 parties les valeurs moyennes obtenues seront peu écartées de celles correspondant au calcul).

On a donc pour stratégie optimale :

En phase I : si $x_1 = A$, prendre $y_1 = A$,
$= B$, — $= B$,
$= C$, — $= B$,
$= D$, — $= C$.

En phase II : si $x_2 = A$, prendre $y_2 = B$,
14.7 $= B$, — $= D$,
$= C$, — $= B$,
$= D$, — $= C$.

En phase III : si $x_3 = A$, prendre $y_3 = B$,
$= B$, — $= B$,
$= C$, — $= C$,
$= D$, — $= C$.

Ces stratégies optimales sont présentées sur la figure (14.3).

Remarque importante

Lorsque l'*avenir est aléatoire*, et si l'on se donne comme critère l'optimisation de l'espérance mathématique de la valeur totale, cette optimisation ne peut être menée que dans un sens : en remontant du futur vers le passé. Ceci est une conséquence de la façon séquentielle dont est calculée cette espérance mathématique.

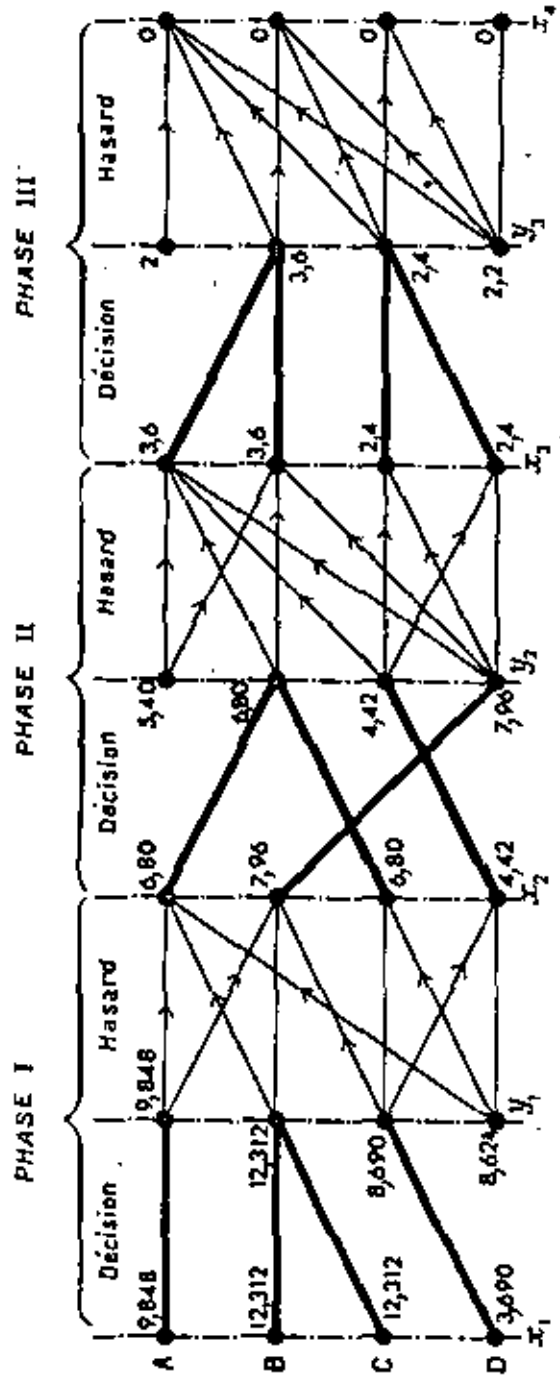


FIG. 14.3. — Présentation des stratégies optimales

SECTION 15

DEUX EXEMPLES DE PROGRAMMATION DYNAMIQUE EN AVENIR ALÉATOIRE

1. *Un problème de réapprovisionnement.* — 2. *Représentation par un graphe d'un processus séquentiel aléatoire discret.* — 3. *Remplacement d'un ensemble d'équipements.* — 4. *Un problème de remplacement plus compliqué.* — 5. *Evaluation du risque pour une stratégie optimale.* — 6. *Stratégies penoptimales.*

1. Un problème de réapprovisionnement.

Un article est réapprovisionné tous les trois mois et on se préoccupe de la gestion annuelle. Le stock initial est nul.

La demande trimestrielle u_i pour le trimestre i, $i = 1, 2, 3, 4$, est aléatoire et sa loi de probabilité $\phi(u_i)$ est la même pour chacun des quatre trimestres. Le coût de stockage d'un article par trimestre est C_1 ; lorsque le stock est insuffisant pour faire face à la demande (situation de pénurie), il y a des ventes « *perdues* » et il en résulte un préjudice évalué à C_2 par article.

Par ailleurs, pour différentes raisons, on ne peut dépasser un stock égal à S.

Introduisons les notations suivantes :

s_i, stock à la fin du trimestre $i - 1$ (avant le réapprovisionnement a_i) ;
σ_i, stock au début du trimestre i (après le réapprovisionnement a_i) ;
$a_i = \sigma_i - s_i$, réapprovisionnement au début du trimestre i ;
u_i, demande aléatoire [1] dans le trimestre i.

Nous allons montrer comment on obtient la valeur minimale de l'espérance mathématique du coût total du stockage pour l'année, en utilisant la programmation dynamique. Nous introduirons des données numériques permettant de suivre facilement les calculs, supposerons que la demande u_i peut être de 0, 1, 2 ou 3 articles et que le stock ne doit jamais

[1] On ne sait pas à l'avance à quelles dates du trimestre les articles seront demandés, et on suppose que la probabilité d'une demande un certain jour j de ce trimestre est la même que pour tout autre jour.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

PROGRAMACION DINAMICA

M. EN I. FERNANDO SCHUTZ ESTRADA

NOVIEMBRE, 1980

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

Capítulo 11

Programación dinámica

11.1. Introducción

La programación dinámica es una técnica matemática de optimización, especialmente aplicable a resolver problemas que contienen diversas alternativas que se establecen en un proceso de múltiples etapas o pasos. El término programación tiene el mismo significado que en el caso de la programación lineal; es decir, el de una planeación de actividades, de entre las cuales se determinan aquellas que producen la mejor solución o que optimizan el problema. El término dinámica es debido al tipo de problemas en que tuvo sus primeras aplicaciones esta técnica, en los que la variable tiempo indicaba el paso de una etapa a otra, siendo un ejemplo de este tipo de problemas el de la determinación de la ruta crítica (ver capítulo 12).

Las aplicaciones de la programación dinámica son muy amplias y comprenden áreas tan diferentes como la química, la electrónica, la ingeniería industrial, de control y aerodinámica, además de la investigación de operaciones, las matemáticas y la economía. Algunos problemas específicos resueltos con programación dinámica son los de transporte, inventario, ascenso mínimo para aviones o proyectiles, trayectorias de satélites, control realimentado, predicción lineal y reemplazo de equipo (*)

En forma general, la programación dinámica permite resolver problemas que se caracterizan por el hecho de que una solución tomada en el tiempo o etapa presente afecta el comportamiento del proceso en una etapa o tiempo futuro, por lo cual la solución al problema es una secuencia de decisiones que comprende la duración total del proceso y no una sola decisión establecida en el tiempo presente.

La justificación de la programación dinámica para la solución de problemas de optimización, proviene de la representación incorrecta de muchos fenómenos reales, como los que se resuelven con la programación lineal o con el cálculo diferencial; es decir, la programación dinámica permite resolver problemas de carácter más general que los que permite la programación lineal y las principales ventajas con respecto a esta última son que

1. Se obtiene una solución óptima, aun cuando la región de soluciones factibles no sea convexa.
2. No está restringida a variables continuas.

Ambas condiciones son fundamentales en la solución de problemas de programación lineal, como se estudió en el capítulo 10.

Las desventajas que se tienen en el cálculo diferencial son mayores, ya que las fuertes suposiciones que lo definen hacen que en problemas de optimización sea una herramienta matemática de uso limitado. El requisito impuesto por el cálculo diferencial de que una función que describe un problema sea continua y con derivadas continuas en todos los puntos, es frecuentemente irreal en situaciones prácticas, como puede ser la expansión de un sistema eléctrico o de vías terrestres, donde la solución del problema queda en términos de variables enteras que describen funciones no continuas. Esto significa que habrá que encontrar un número entero de plantas eléctricas o de caminos, donde no habrá continuidad entre el costo de una de las plantas eléctricas y la siguiente.

Otra limitación importante del cálculo diferencial está en que no distingue directamente entre un mínimo y un máximo, a menos que se aplique un criterio secundario, como que la segunda derivada de la función sea mayor que cero para un mínimo o menor que cero para un máximo. Además, no es posible localizar puntos óptimos cuando éstos no satisfacen la condición de que la primera

* El planteamiento y solución de estos problemas empleando programación dinámica se pueden encontrar en "Applied Dynamic Programming" de R. Bellman y S. Dreyfus, de la Editorial Princeton.

derivada sea cero, lo que puede ocurrir en la frontera del rango de la función considerada, como se muestra en la figura 11-1.

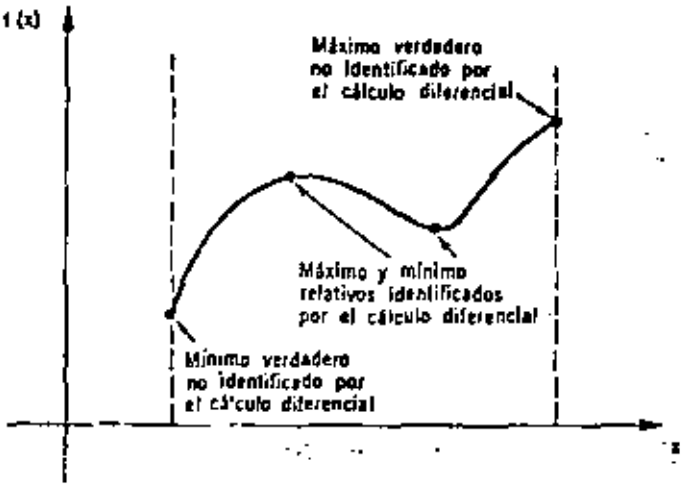


Fig. 11-1. Localización de los puntos óptimos por medio del cálculo diferencial.

Estas limitaciones del cálculo diferencial son superadas por la programación dinámica, la cual realiza una búsqueda sistemática a través del conjunto de combinaciones posibles de los valores de las variables que definen una función objetivo del problema considerado, hasta determinar la solución óptima. Esta idea, junto con la gran velocidad del computador para buscar la mejor solución a través de diferentes alternativas, han producido mucho del desarrollo de la programación dinámica.

11-2. Programación dinámica y un proceso de N etapas

Un problema que permite analizar un proceso de decisiones en N etapas y que corresponde a una de las aplicaciones típicas de la programación, se establece a partir de la figura 11-2, en la que se muestra un conjunto de ciudades representadas por círculos y las diversas carreteras que las unen. Asociado a cada recorrido entre las ciudades existe un costo y el problema consiste en determinar cuáles son las rutas más económicas cuando se parte de cualquiera de las ciudades marcadas con las letras A, B y C, y se viaja hasta cualquiera de las ciudades marcadas con las letras M, N, O, teniendo que transbordar necesariamente en tres sitios diferentes.

Se puede notar, como una primera característica del problema, que decidir por el recorrido más económico al salir y transbordar de ciudad en ciudad hasta llegar al final, no necesariamente determina la ruta total más económica. Con base en este criterio, si se quiere ir desde la ciudad A a la M se pasaría por las ciudades D, H, y J, teniendo unos costos de 23.50 + 34.80 + 79.50 + 53.40, produciendo un costo total de 191.20. Sin embargo, la ruta $AEIKM$ tiene una serie de costos de 33.45 + 25.95 + 10.10 + 26.75, que da un costo total de 96.25, que es un valor inferior al anterior.

Una forma de resolver este problema es analizando todas las trayectorias posibles, que en este caso particular son $3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 243$, lo cual implica un desarrollo muy laborioso. Como se indica a continuación y en el ejemplo de la sección 11-5, la programación dinámica principia examinando una pequeña parte del problema, la cual se optimiza. A partir de esta solución se amplía el problema, el cual se vuelve a optimizar y así sucesivamente hasta resolver completamente el problema original. En base a esta característica en lugar de tener que examinar las 243 trayectorias posibles, sólo hay que examinar 36. El llamado *principio de optimalidad*, que es la base de la programación dinámica, establece que cualquier porción de una trayectoria óptima es también óptima y permite asegurar que la solución óptima del problema se encuentra dentro de esas 36 trayectorias que hay que examinar.

Con el fin de manejar en forma sistemática los problemas de programación dinámica se definen las *variables de decisión* X_n, donde n puede ser 1, 2, 3 o 4 para el ejemplo considerado. La variable representa la ciudad inmediata que se selecciona o por la que se decide, cuando todavía faltan n etapas por recorrer. Aplicando esta idea, en el caso que se quiera ir de la ciudad A a la M, la ruta seleccionada es $A \rightarrow X_4 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2 \rightarrow X_1$; X_4 se escoge de entre las ciudades D, E, F; X_3 se escoge de entre las ciudades G, H, I; X_2 de entre las ciudades J, K, L y X_1 es M. Se puede ver que el valor que adquiere la variable de decisión corresponde al valor de uno de los estados; en este ejemplo los valores de los estados no son numéricos sino que están definidos por una letra. En la sección 11-3 al programar el problema se les asigna arbitrariamente el estado 1 a las ciudades A, D, G, J, M, el estado 2 a B, E, H, K, N y el estado 3 a C, F, I, L, O.

El concepto de variable de decisión, junto con el de la función de costo que se presenta a continuación, así como los conceptos de etapa y estado que son los términos de uso común en la programación dinámica, se muestran en la figura 11-3. En el ejemplo, los estados son las ciudades y las etapas corresponden a los trayectos que hay que efectuar antes de transbordar.

La función $f_n(S, X_n)$ se emplea para representar el costo total de la mejor ruta para las últimas n etapas, sabiendo que se está en el estado S y se decide por X_n como la próxima ciudad adonde hay que ir. Dado un estado, o sea la ciudad S cualquiera, y la etapa n del recorrido, se define X_n^* como valor de X_n que minimiza la función $f_n(S, X_n)$. Sea $f_n^*(S)$ el valor mínimo correspondiente de la función; es decir, que $f_n^*(S) = f_n^*(S, X_n^*)$.

De acuerdo a la nomenclatura anterior y para el ejemplo considerado, si se quiere ir desde la ciudad A hasta cualquiera de las ciudades M, N u O, se busca determinar

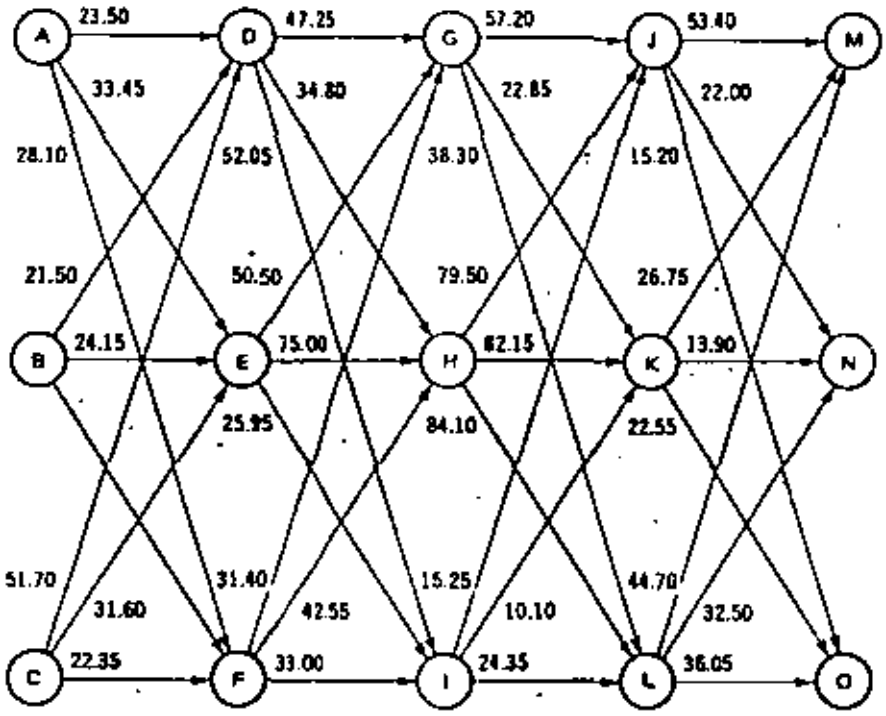


Fig. 11-2. Proceso de decisiones de N etapas.

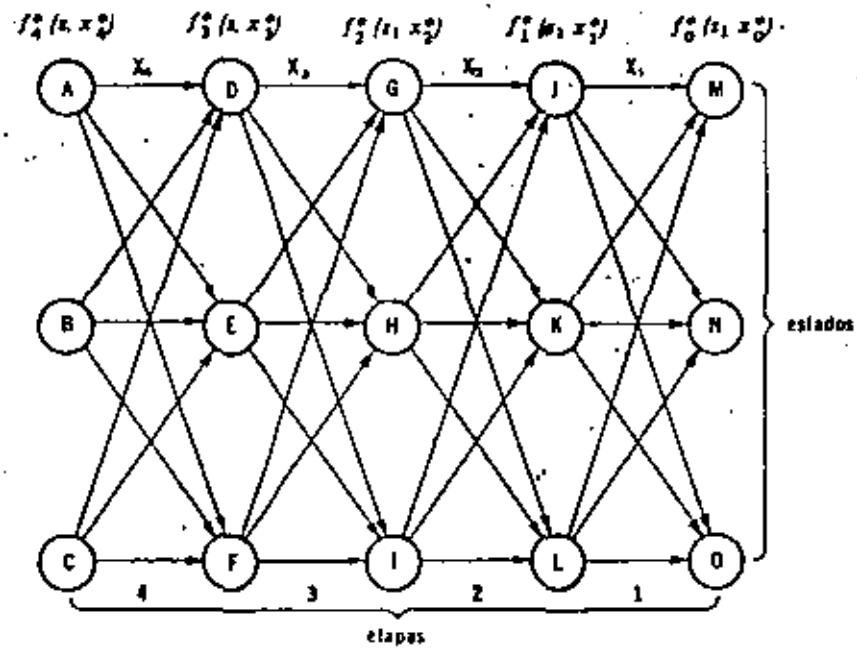


Fig. 11-3. Elementos principales de la programación dinámica.

$f_4^*(A)$ que representa el costo mínimo. Para lograr esto es necesario calcular primero $f_1^*(S)$, donde S es alguno de los estados J, K, L, luego $f_2^*(S)$ donde S es alguno de los estados G, H, I, a continuación $f_3^*(S)$ donde S es alguno de los estados D, E, F, y por último $f_4^*(A)$.

Calcular $f_1^*(S)$, que es el primer paso para resolver el problema, equivale a buscar las rutas de costo mínimo de los estados J, K, L a los estados M, N, O. (Ver figura 11-2). Así, si se está en la ciudad L conviene viajar a la ciudad N ya que representa el costo mínimo, o sea que X_1 se puede escoger para el estado L entre los trayectos a M, N u O, quedando X_1 igual a N. El desarrollo anterior

permite determinar el costo mínimo, ya que $f_1^*(L, X_1)$ puede ser $f_1(L, M)$, $f_1(L, N)$ ó $f_1(L, O)$. Como X_1^* es igual a N, se tiene $f_1(L, N) = f_1^*(L)$ y de acuerdo a la figura 11-2 queda $f_1^*(L) = 32.50$.

En base al mismo razonamiento, cuando se está en la ciudad K se tiene que X_1^* es N y que $f_1(K,N) = f_1^*(K)$ con un valor de 13.90.

Se procede en la misma forma para el caso de estar en J, donde $X_1^* = O$ y $f_1^*(J) = 15.20$. Los cálculos anteriores se resumen en la tabla 11-1.

Tabla 11-1. Trayectorias óptimas a partir de los estados J,K,L.

S(Estado)	$f_1^*(S)$	X_1^*
J	15.20	O
K	13.90	N
L	32.50	N

La tabla anterior se puede escribir en forma más general, como se muestra en la tabla 11-2.

Tabla 11-2. Trayectorias óptimas a partir de los estados J,K,L.

$$f_1(S, X_1) = C_{SX_1} + f_0^*(X_1)$$

S \ X_1	M	N	O	$f_1^*(S)$	X_1^*
J	53.40	22.00	15.20	15.20	O
K	36.75	13.90	22.55	13.90	N
L	44.70	32.50	36.05	32.50	N

La expresión en la parte superior de la tabla 11-2 corresponde a la *ecuación recurrente* del ejemplo. Se puede decir que la estructura de cada problema particular define la forma de la misma y es ésta una de las características de la programación dinámica. En la ecuación recurrente del ejemplo, $f_0(X_1)$ vale cero para toda X_1 y C_{SX_1} representa los costos asociados a cada trayecto desde el estado S, cuando la variable de decisión es X_1.

Una vez definido el costo correspondiente a los estados J, K y L, se pueden analizar los estados cuando faltan dos etapas por recorrer. Así, si se está en la ciudad I, se puede ir a las ciudades J, K o L, a un costo de 15.25, 10.10 y 24.35, respectivamente. Para determinar a qué ciudad hay que dirigirse, se tiene la ecuación siguiente:

$$f_2(S, X_2) = C_{SX_2} + f_1^*(X_2) \qquad (11\text{-}1)$$

de donde se pueden obtener los siguientes resultados

$$\begin{aligned} f_2(I, L) &= C_{IL} + f_1^*(L) \\ &= 24.35 + 32.50 \\ &= 56.85 \\ f_2(I, K) &= C_{IK} + f_1^*(K) \\ &= 10.10 + 13.90 \\ &= 24.00 \\ f_2(I, J) &= 15.25 + 15.20 \\ &= 30.45 \end{aligned}$$

Para determinar $f_2(I, X_2^*)$ se tiene que

$$\begin{aligned} f_2(I, X_2^*) &= \min\{f_2(I, L), f_2(I, K), f_2(I, J)\} \\ &= \min\{56.85, 24.00, 30.45\} \end{aligned}$$

es decir

$$f_2(I, X_2^*) = 24.00$$

También

$$f_2^*(I) = 24.00$$

donde X_2^* es igual a K.

Procediendo en la misma forma, se tiene que

$$\begin{aligned} f_2(H, X_2^*) &= \min\{f_2(H, L), f_2(H, K), f_2(H, J)\} \\ &= \min\{84.10 + 32.50, 82.15 + 13.90, 79.50 + 15.20\} \\ &= 94.70 \end{aligned}$$

o sea

$$f_2^*(H) = 94.70$$

y X_2^* es igual a J.

De la misma forma se procede para G. Los cálculos anteriores y los del estado G se presentan en la tabla 11-3.

Pasando ahora a los estados D,E,F, faltan tres etapas por recorrer, y procediendo exactamente igual se define la ecuación

$$f_3^*(S, X_3) = C_{SX_3} + f_2^*(X_3) \qquad (11\text{-}2)$$

Tabla 11-3. Determinación de $f_2^*(S)$.

$$f_2(S, X_2) = C_{SX_2} + f_1^*(X_2)$$

Estado S \ X_2	J	K	L	$f_2^*(S)$	X_2^*
G	72.40	36.75	70.80	36.75	K
H	94.70	96.05	115.60	94.70	J
I	30.45	24.00	56.85	24.00	K

Así, si se está en el estado F y se quiere ir a I, se tiene $f_3(F, I) = 33.00 + 24.00 = 57.00$ en donde C_{FI} es igual a 33.00 y $f_2^*(I)$ vale 24.00. Si se calcula $f_3(F, H)$ y $f_3(F, G)$ se obtienen 137.25 y 68.15, respectivamente, de donde se concluye que $f_3^*(F) = 57.00$. Este y los demás resultados correspondientes a esta etapa se muestran en la tabla 11-4.

Tabla 11-4. Determinación de $f_3^*(S)$.

$$f_3(S, X_3) = C_{SX_3} + f_2^*(X_3)$$

Estado S \ X_3	G	H	I	$f_3^*(S)$	X_3^*
D	84.00	129.50	76.05	76.05	I
E	87.25	169.70	49.95	49.95	I
F	68.15	137.25	57.00	57.00	I

Pasando a la cuarta etapa, se procede en forma idéntica a los casos anteriores. Los resultados de los costos y las variables escogidas para cada estado se presentan en la tabla 11-5.

Tabla 11-5. Determinación de $f_4^*(S)$.

$$f_4(S, X_4) = C_{SX_4} + f_3^*(X_4)$$

Estado S \ X_4	D	E	F	$f_4^*(S)$	X_4^*
A	99.55	83.40	85.10	83.40	E
B	97.55	74.10	77.00	74.10	E
C	127.75	81.55	79.35	79.35	F

Los cálculos anteriores se resumen en la figura 11-4, en la cual se muestran dentro de los círculos los valores de la función de costo $f_n^*(S)$ y el valor de la variable de decisión X_n^* para cada etapa $n = 1, 2, 3, 4$ y para cada uno de los estados. Con estos valores se determinan cuáles son las trayectorias óptimas para diversos problemas que se pueden plantear dentro de la red. Por ejemplo, si se quiere ir de la forma más económica desde la ciudad A a cualquiera de las ciudades del este, de la figura 11-4 se ve que la ruta indicada es $A \to E \to I \to K \to N$, con un costo total de 83.40. Si el recorrido se inicia en la ciudad B, entonces la ruta es $B \to E \to I \to K \to N$, con un costo de 74.10. De la misma forma, para C se tiene la ruta $C \to F \to I \to K \to N$, con un costo de 79.35.

Los casos anteriores representan un tipo de problema con condición inicial dada y condición final abierta. Otro

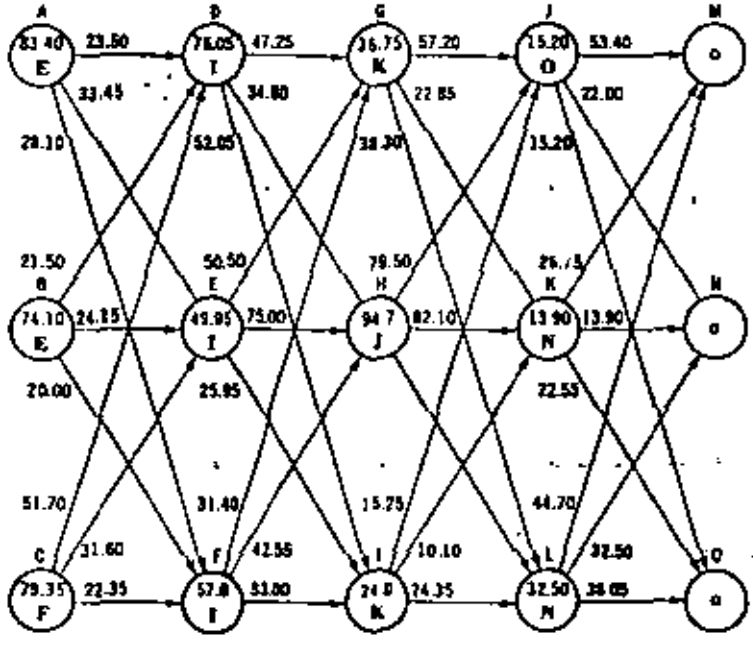


Fig. 11-4. Trayectoria óptima con la función de costo y la variable de decisión para cada etapa y estado.

problema puede ser determinar la ruta más económica para viajar desde la ciudad A a la M y de acuerdo a la figura 11-4, la trayectoria es $A \rightarrow E \rightarrow I \rightarrow K \rightarrow M$. Debido a que ahora es necesario recorrer de K a M, el costo de esta trayectoria se incrementa en un valor 26.75 − 13.90, que representa la diferencia de ir al estado M en lugar de ir a N. El costo para esta ruta se convierte entonces en 83.40 + 26.75 − 13.90 = 96.25.

Igualmente, podría interesar determinar la ruta entre B ó C y alguna ciudad final M, N, O. En un caso como el anterior, en el cual se fijan las condiciones inicial y final, se dice que se tiene un problema de condiciones en la frontera.

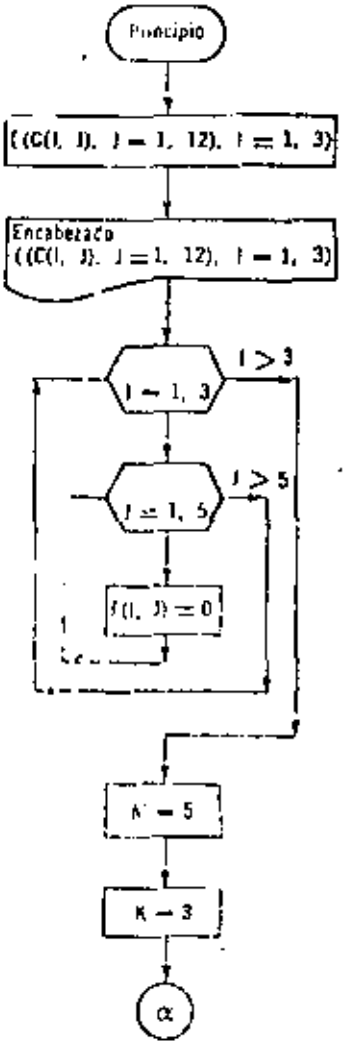
Otro aspecto que se tiene dentro del análisis y que representa una ventaja propia de la programación dinámica es que no importa en qué estado se esté, siempre se puede determinar la mejor ruta. Por ejemplo, si se está en la ciudad D y se quiere ir a O, la mejor ruta queda definida como $D \rightarrow I \rightarrow K \rightarrow O$, con un costo de 76.05 + 22.55 − 13.90 = 84.70.

11-3. Programa para determinar la trayectoria más económica

El diagrama de flujo para resolver el problema anterior se muestra en la figura 11-5. El significado de las principales variables del diagrama, que también aparecen en el programa correspondiente, es el siguiente:

$C(I, J)$ = Matriz de costos.

$F(I, J)$ = Matriz de la función de costos para cada estado.



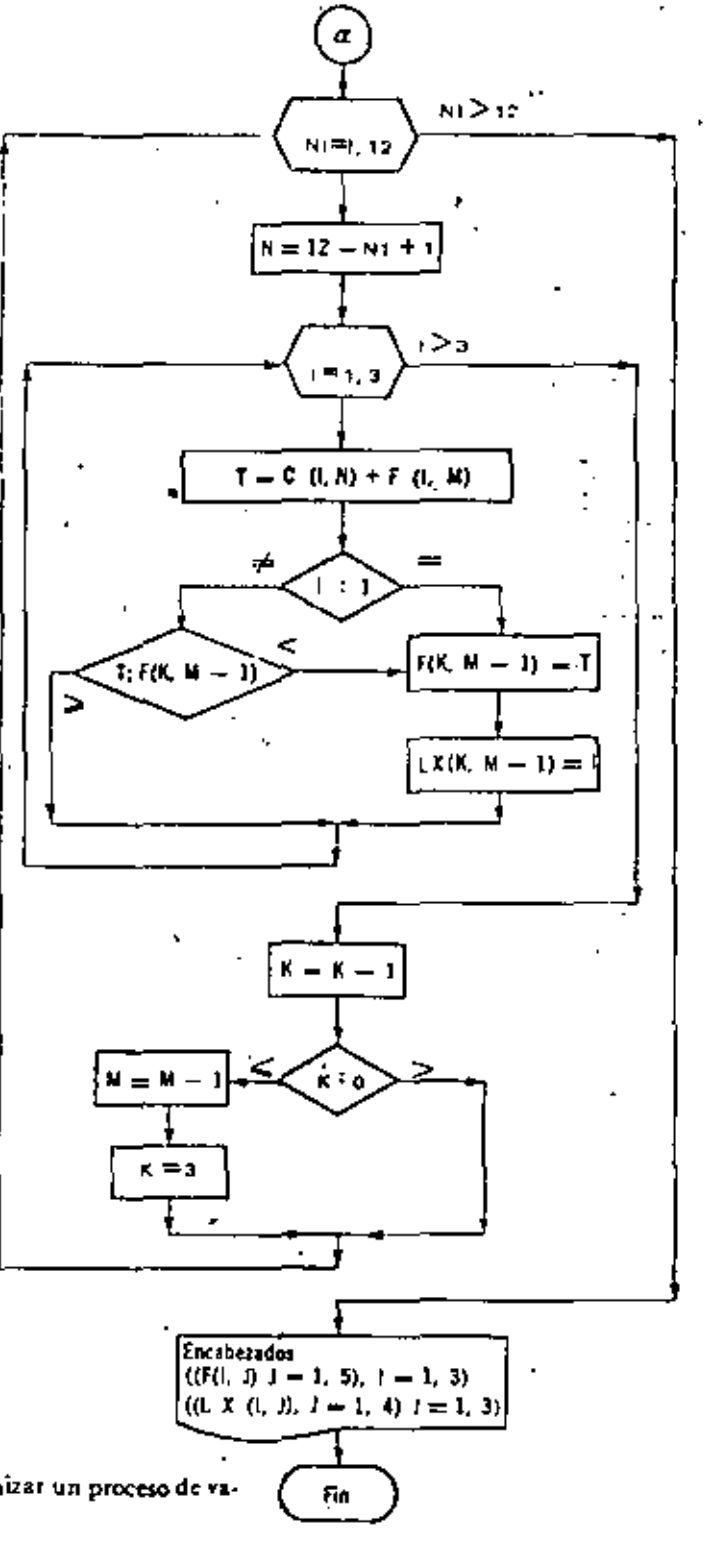


Fig. 11-5. Diagrama de flujo para optimizar un proceso de varias etapas.

$LX(I,J)$ = Matriz para las variables de decisión, indicando de dónde proviene el menor costo.

La matriz de costos que se emplea en el programa se construye de la forma siguiente: la última columna corresponde a los costos de ir desde la ciudad L a las ciudades M, N y O; la antepenúltima columna corresponde a los costos de ir desde K hasta M, N y O.

De esta manera se construye toda la matriz hasta que en la primera columna se tienen los costos de ir desde A hasta D, E, y F. Para el ejemplo que se viene analizando se tiene una matriz de 3 renglones y 12 columnas.

La matriz F, que corresponde a la función de costos para cada estado, se calcula a partir del procedimiento explicado en la sección anterior y su orden en este caso es de 3 renglones por 5 columnas. La matriz LX consta de 3 renglones y 4 columnas en el ejemplo y contiene el valor de la variable X_n^* en cada etapa y cada estado. Para explicar cómo se construye esta matriz se tiene en la figura 11-6 una representación esquemática de las trayectorias óptimas de la figura 11-4 y donde se asigna a las ciudades A, D, G, J, M el estado 1, a las B, E, H, K, N el estado 2 y a las C, F, I, L, O el estado 3, indicándose también las etapas 4, 3, 2, 1.

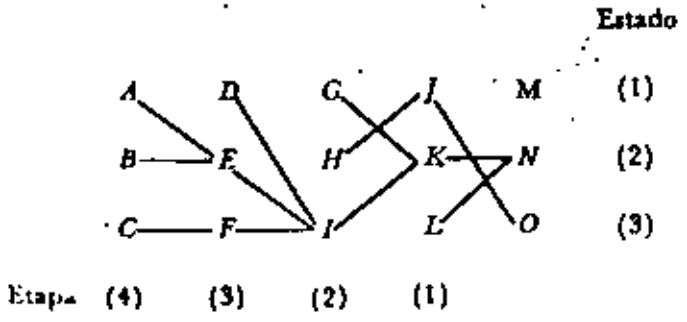


Fig. 11-6. Formación de la matriz LX a partir de las trayectorias óptimas.

De la figura se observa que es posible construir un arreglo matricial que permita identificar el valor de la variable X_n^* que se ha obtenido en cada estado. Así, si se está en la primera etapa y en el estado J se pasa al estado O que representado por un 3, matricialmente se puede indicar guardando el 3 en la cuarta columna y primer renglón, del estado K se pasa al N representado por un 2; es decir, que se tendrá el 2 en la cuarta columna, segundo renglón; continuando de esta forma se obtiene la matriz LX que se muestra a continuación y que permite determinar las trayectorias óptimas al igual que la figura 11-4.

$$LX = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

En la figura 11-7 se muestra el listado del programa y los datos, y en la figura 11-8 se tienen los resultados del ejemplo de la sección anterior en donde se muestran los datos de la matriz C, la matriz de la función de costos F y la matriz LX de las variables de decisión.

11-4. Características de los problemas de programación dinámica

El ejemplo examinado en la sección 11-2 es un caso típico de los problemas de programación dinámica, de manera que una forma de reconocer que una situación puede ser formulada como un problema de programación dinámica, es notar que su estructura fundamental sea semejante a la de este ejemplo.

Dentro de las características asociadas a los problemas de programación dinámica, se pueden distinguir las que son propias del planteamiento o estructura del problema y las que corresponden a la solución del mismo.

Las características propias de la estructura del problema son:

1. El problema puede dividirse en varias etapas, en cada una de las cuales se requiere dar una decisión de acuerdo con cierto criterio.

El ejemplo anterior está dividido en 4 etapas y la decisión que se toma en cada una de las etapas es la próxima ciudad hacia la cual se va a viajar, con el criterio de que el recorrido sea de costo mínimo.

2. Cada etapa consta de un cierto número de estados y en el ejemplo los estados son las ciudades, las cuales están unidas a una cierta etapa. En general, los estados representan las posibles condiciones que puede adquirir el problema en una cierta etapa.

3. El efecto de una decisión en cada etapa es transformar el estado que se examina en un estado asociado con la siguiente etapa.

La red establecida consiste de columnas formadas de nodos, donde cada columna corresponde a una etapa y en cada decisión se cambia de etapa o sea que se avanza de columna.

4. El conocimiento del costo asociado a un estado contiene toda la información acerca del comportamiento del problema y permite determinar la mejor decisión a partir de ese estado.

En el ejemplo se indica cómo a partir de cualquier estado se puede definir una trayectoria óptima hasta alcanzar una de las ciudades M, N, O, sin importar cómo se llegó a ese estado.

Las características propias de la solución del problema son:

1. El método de solución principia encontrando la trayectoria óptima para cada uno de los estados de la última etapa y se define una ecuación recurrente que identifica la decisión óptima para cada estado, cuando faltan n etapas por recorrer.

```
C       PROGRAMACION DINAMICA PARA OPTIMIZAR UN PROCESO DE
C       VARIAS ETAPAS
        DIMENSION C(3,12),F(3,5),LX(3,4)
  100   FORMAT(12F6.2)
  101   FORMAT(1H1,6X,*M A T R I Z  C*)
  102   FORMAT(12X,12F7.2)
  103   FORMAT(//7X,*M A T R I Z  F*)
  104   FORMAT(//7X,*M A T R I Z  LX*)
  105   FORMAT(2X,4I4)
C       LECTURA DE DATOS
        DO 1 I=1,3
      1 READ(5,100)(C(I,J),J=1,12)
C       IMPRESION DE ECO
        WRITE(6,101)
        DO 2 I=1,3
      2 WRITE(6,102)(C(I,J),J=1,12)
C       DEFINICION DE LA MATRIZ F Y LAS VARIABLES M Y K
        DO 3 I=1,3
        DO 3 J=1,5
      3 F(I,J)=0.
        M=5
        K=3
C       CALCULO DE LAS TRAYECTORIAS MAS ECONOMICAS
        DO 6 N1=1,12
        N=12-N1+1
        DO 5 I=1,3
        T=C(I,N)+F(I,M)
        IF(I.EQ.1)GO TO 4
        IF(T.GE.F(K,M-1))GO TO 5
      4 F(K,M-1)=T
        LX(K,M-1)=I
      5 CONTINUE
        K=K+1
        IF(K.GT.0)GO TO 6
        M=M-1
        K=3
      6 CONTINUE
C       IMPRESION DE RESULTADOS
        WRITE(6,103)
        DO 7 I=1,3
      7 WRITE(6,102)(F(I,J),J=1,5)
        WRITE(6,104)
        DO 8 I=1,3
      8 WRITE(6,105)(LX(I,J),J=1,4)
        CALL EXIT
        END
```

Fig. 11-7. programa para calcular trayectorias óptimas.

```
23.50 21.50 51.70 47.25 50.50 31.40 57.20 79.50 15.25 53.40 26.75 44.70
33.45 24.15 31.60 34.80 75.00 42.55 22.85 82.15 10.10 22.00 13.90 32.50
28.10 20.00 22.35 52.05 25.95 33.00 38.30 84.10 24.35 15.20 22.55 36.05

   M A T R I Z   C
23.50  21.50  51.70  47.25  50.50  31.40  57.20  79.50  15.25  53.40  26.75  44.70
33.45  24.15  31.60  34.80  75.00  42.55  22.85  82.15  10.10  22.00  13.90  32.50
28.10  20.00  22.35  52.05  25.95  33.00  38.30  84.10  24.35  15.20  22.55  36.05

   M A T R I Z   F
83.40  76.05  36.75  15.20   0.00
74.10  49.95  94.70  13.90   0.00
79.35  57.00  24.00  32.50   0.00

   M A T R I Z   LX
 2   3   2   3
 2   3   1   2
 3   3   2   2
```

Fig. 11-8. Resultados del programa de trayectorias óptimas.

En el ejemplo de la sección 11-2, la ecuación recurrente general está definida por

$$f_n^*(S) = \min_{X_n} \{C_{X_n} + f_{n-1}^*(X_n)\} \quad (11\text{-}3)$$

La ecuación recurrente anterior puede diferir en los problemas de programación dinámica, por lo que se tiene que encontrar esta ecuación recurrente para cada caso particular.

2. Empleando la ecuación recurrente, el método de solución es recorrer la red de atrás hacia adelante, pasando por las diferentes etapas, encontrando en cada etapa las variables de decisión y la función de costo correspondiente a cada estado, continuando así sucesivamente hasta determinar la trayectoria óptima a partir de la etapa inicial.

11-5. Aplicación al despacho económico de carga eléctrica

Como un segundo ejemplo de aplicación de la programación dinámica se puede calcular el despacho económico de cargas en un sistema eléctrico de potencia.

El problema se puede plantear en la forma siguiente: tres plantas térmicas abastecen un centro de carga que demanda una cierta cantidad de energía eléctrica P de 180 MW, y se pregunta cuánta energía eléctrica debe proporcionar cada una de las plantas de manera que el costo total de generación sea mínimo, teniendo en cuenta que a cada planta le corresponde una curva característica que relaciona la producción de energía con su costo, como se muestra en la figura 11-9.

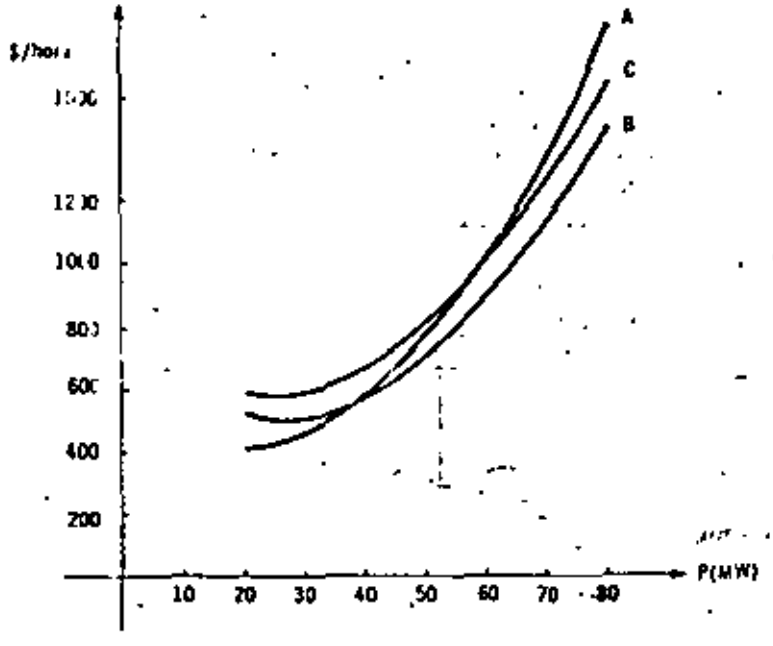


Fig. 11-9. Curvas características de costo-generación.

Las ecuaciones que corresponden a cada curva característica son:

$$\text{Curva } A \quad C_1 = 0.3\,P^2 - 18.0\,P + 738.0$$

$$\text{Curva } B \quad C_2 = 0.166\,P^2 - 6.66\,P + 616.0 \qquad (11\text{-}4)$$

$$\text{Curva } C \quad C_3 = 0.208\,P^2 - 12.08\,P + 733.3$$

Con las ecuaciones (11-4) es posible construir la tabla 11-6 en la cual se tiene el costo de producción a intervalos de 15 MW para cada una de las plantas, a partir de 20 MW, que sería la producción mínima.

Tabla 11-6. Costo de producción de las plantas térmicas A, B y C.

Generador A		Generador B		Generador C	
MW	Pesos/hora	MW	Pesos/hora	MW	Pesos/hora
20	468.8	20	550.0	20	558.1
35	536.3	35	586.2	35	610.9
50	738.8	50	698.0	50	757.3
65	1068.3	65	887.0	65	997.9
80	1548.8	80	1145.6	80	1331.2

La forma de aplicar la programación dinámica consiste en considerar inicialmente todas las posibles combinaciones de generación establecidas en la tabla 11-6, empleando sólo los generadores A y B. La tabla 11-7 muestra los resultados del costo de generación de las 25 posibles combinaciones producidas por los generadores A y B.

En la columna de costo total de la tabla 11-7, se indican con asterisco los costos mínimos para producir 40, 55, 70, 85, 100, 115, 130, 145 y 160 MW, dentro de las posibles combinaciones. Estas respuestas representan los valores de la función de costo asociados a estos estados. Procediendo hacia una nueva etapa que consiste en agregar el generador C, los cálculos correspondientes a esta nueva etapa y en la cual se determina el costo mínimo para generar 180 MW, se muestran en la tabla 11-8.

En la tabla 11-8 se observa que el costo mínimo para producir 180 MW es de $2,623.10 por hora, proporcionando 65 MW el generador C y 115 MW entre los generadores A y B. Para producir en forma más eco-

Tabla 11-7. Combinaciones posibles de operación entre los generadores A y B.

Grupo	G.A.	G.B.	Gen. total	Costo (A+B)	Costo total
	20	20	40	468.8+550.0	1018.8 *
	20	35	55	468.8+586.2	1055.0 *
1	20	50	70	468.8+698.0	1166.8
	20	65	85	468.8+887.0	1355.8
	20	80	100	468.8+1145.6	1614.4
	35	20	55	536.3+550.0	1086.3
	35	35	70	536.3+586.2	1122.5 *
2	35	50	85	536.3+698.0	1234.3 *
	35	65	100	536.3+887.0	1423.3 *
	35	80	115	536.3+1145.6	1681.9
	50	20	70	738.8+550.0	1288.8
	50	35	85	738.8+586.2	1325.0
3	50	50	100	738.8+698.0	1436.8
	50	65	115	738.8+887.0	1625.8 *
	50	80	130	738.8+1145.6	1884.4 *
	65	20	85	1068.3+550.0	1618.3
	65	35	100	1068.3+586.2	1654.5
4	65	50	115	1068.3+698.0	1766.3
	65	65	130	1068.3+887.0	1955.3
	65	80	145	1068.3+1145.6	2213.9 *
	80	20	100	1548.8+550.0	2098.8
	80	35	115	1548.8+586.2	2135.0
5	80	50	130	1548.8+698.0	2246.8
	80	65	145	1548.8+887.0	2435.8
	80	80	160	1548.8+1145.6	2694.4 *

nómica los 115 MW, el generador A debe entregar 50 MW y el generador B 65 MW.

Por la forma en que se ha discretizado la generación, sólo se obtienen resultados en incrementos de 15 MW. Es obvio que una mayor precisión en los resultados hace necesario tomar intervalos de generación más pequeños,

Tabla 11-8. Generación óptima de 180 MW.

$A+B$ MW	Costo $A+B$ \$ por hora	C MW	C \$/hora	Costo total
20	1018.8			
55	1055.0			
70	1122.5			
85	1234.3			
100	1423.3	80	1331.2	2754.5
115	1625.8	65	997.3	2623.1 *
130	1884.4	50	757.3	2641.7
145	2213.9	35	610.9	2824.7
160	2694.4	20	558.1	3252.5

lo cual repercute en el número de cálculos que hay que efectuar.

En la figura 11-10 se muestra la red correspondiente a este ejemplo donde se observa que el número de estados no es el mismo número dado para cada etapa, lo cual se define a través de una nueva unidad generadora que se agrega. Por otra parte, la función de costo inicial $f_0^*(X_1)$ tiene valores diferentes de cero como ocurría en el ejemplo de la sección 11-2.

11-6. Ejercicios

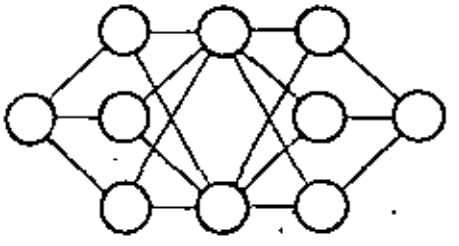
1. Si se tiene una red como la de la figura 11-3, pero formada por 10 etapas y 10 estados en cada etapa, determine el número de posibles trayectorias y compare con el número de trayectorias que hay que calcular cuando se emplea la programación dinámica.

2. Demuestre que para el ejemplo de la sección 11-2 se obtienen los mismos resultados si se calcula la función de costo para cada estado, de adelante hacia atrás.

3. Para una red como la siguiente

indique cómo se puede emplear el programa de la figura 11-6 si se desea una trayectoria máxima y una mínima.

4. En el ejemplo de la sección 11-5 calcule la forma más económica de generar 210 MW.



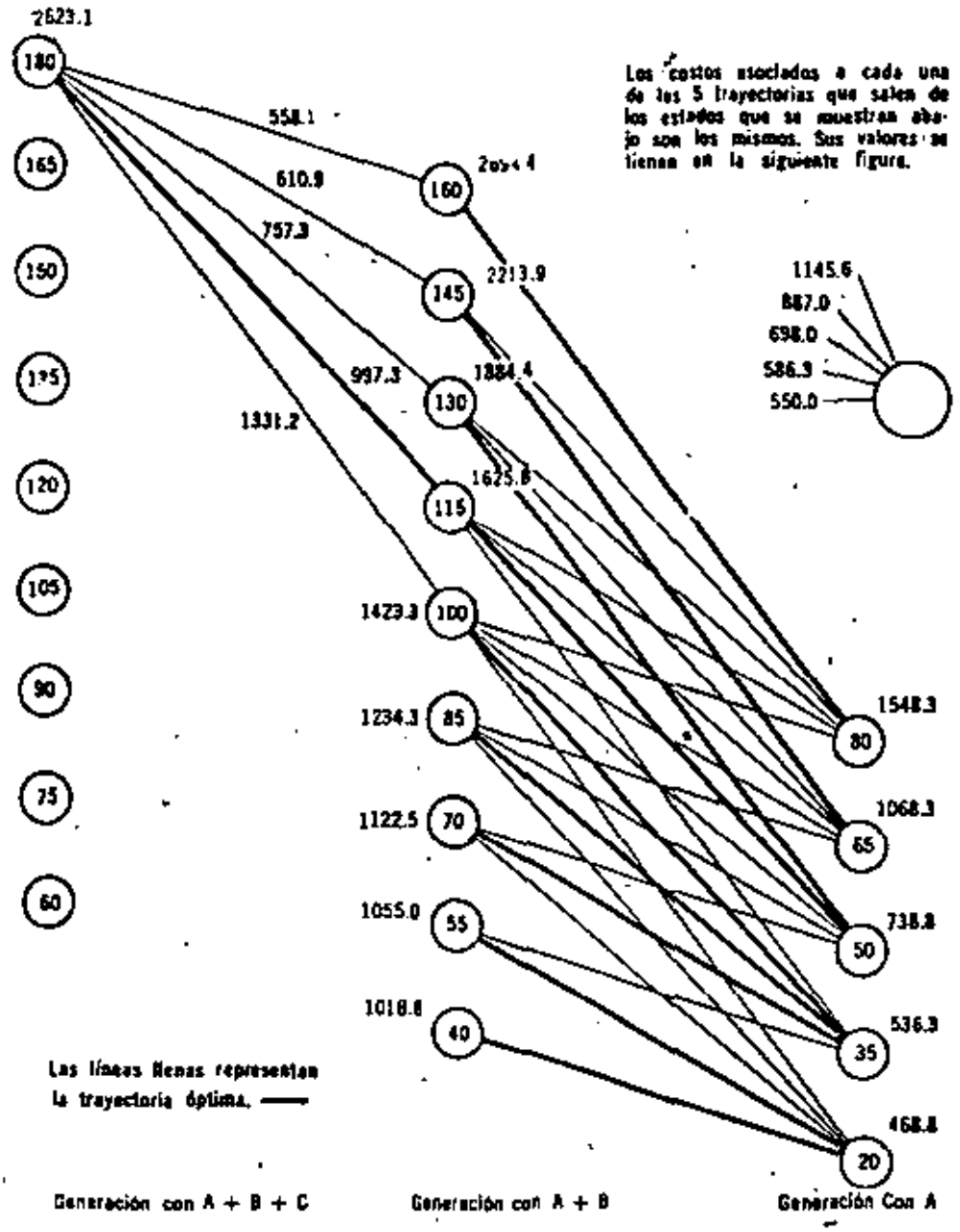


Fig. 11-10. Red correspondiente a la generación óptima de 180 *MW*.

5. Una longitud l se quiere dividir en n partes (donde n es un número entero positivo) de tal manera que el producto de las n partes sea máximo. Determinar cuánto debe medir cada parte, definiendo para ello una ecuación de recurrencia a partir de considerar primero $n = 1$, luego $n = 2$, etc. (Nótese que n define la etapa y dentro de la etapa los estados son continuos).

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

MODELOS DINAMICOS DE FORRESTER

M. EN I. FRANCISCO ALVAREZ CASO

NOVIEMBRE, 1980

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

CURSO:

"FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS"

TEMA:

"MODELOS DINAMICOS DE FORRESTER"

PROFESOR:

M.en I. FRANCISCO JOSE ALVAREZ CASO

FECHA:

NOV 7 a DIC 6 de 1980.

C O N T E N I D O

I. INTRODUCCION

La impartición del curso Dinámica de Sistemas Sociales, en la Sección de Planeación de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, dió origen a este trabajo, mismo que a partir de 1978 se ha ido complementando para utilizarlo como ayuda a este curso.
Para la realización de este trabajo se tomó como base el "DYNAMO USER'S MANUAL, BURROUGHS 1972 , al cual se le -- añadieron varios ejemplos diferentes a los que contiene el manual original, dichos ejemplos son modificaciones de algunos modelos tomados de la bibliografía y otros son originales del autor.

El estudio de estos modelos permite adiestrar a los alumnos en la producción de modelos mucho más complejos y elaborados que resuelven un sinnúmero de problemas de Planeación.
Por este medio quiero expresar mi agradecimiento a mis alumnos de la División de Estudios de Posgrado de Ingeniería de la Sección de Planeación y a los de la División de Estudios de Posgrado de Arquitectura del Area de Tecnología, que se encargaron de procesar algunos modelos que aquí se incluyen y cuya colaboración me fue sumamente valiosa.

II MODELOS

La palabra "modelo" se usa como un sustantivo,un adjetivo y un verbo,en cada caso tiene distinto significado. Como sustantivo, modelo es una representación en el sentido en el cual un arquitecto construye un modelo a esacala o la maqueta de un edificio. Al usarlo como adjetivo modelo, implica un grado de perfección o idealización; el alumno modelo. Cuando se usa como verbo modelar significa demostrar, revelar, indicar cómo es una cosa.
Todos los modelos representan estados,objetos y eventos. Se idealizan en el sentido de que son menos complicados que la realidad y por lo tanto más fáciles para usarlos en investigación. Su simplicidad radica en el hecho de que sólo los aspectos relevantes de la realidad se representan, como el caso de un mapa de carreteras que es un modelo de la superficie terrestre y anf no se contemplan los habitantes,las casas, los cultivos,etc, pues no son relevantes respecto al uso del mapa.

Los modelos se usan para acumular y relacionar nuestro conocimiento de diferentes aspectos de la realidad, y más que esto, sirven como instrumentos para explicar el pasado y el presente y para predecir el futuro.
Existen tres tipos básicos de modelos:

ICONICOS. Son representaciones de la realidad a escacala ;vgr. un avión a escala, una maqueta de un edificio, etc.

ANALOGICOS. Utilizan otras propiedades diferentes de la realidad, o sea que se usa una propiedad para representar a otra; por ejemplo en un mapa para representar los usos del suelo usamos colores; la regla de cálculo es un modelo analógico en el cual las cantidades se representan por distancias proporcionales a sus logaritmos; las gráficas donde se representan propiedades

tales como costos, tiempo, población, porcentajes,también son modelos analógicos.

SIMBOLICOS. Representan las propiedades de la realidad simbólicamente. Una relación mostrada en una gráfica también se puede representar en una ecuación; la ecuación es un modelo simbólico.

Los modelos donde los símbolos empleados representan cantidades se llaman modelos matemáticos. Dentro de los modelos matemáticos tenemos los modelos de simulación dinámica que se clasifican en modelos de tiempo continuo y modelos de eventos discretos o discontinuos.

Los modelos de eventos discretos cambian de estado cuando ocurre algún evento determinado. Este cambio ocurre generalmente en intervalos de tiempo irregulares. El modelo así construido describe actividades o entidades y eventos, y su intemelación, disparándose así, diferentes acciones que simulan la realidad que cambia según mecanismos lógicos prestablecidos. Dentro de este tipo de modelos tenemos a SIMSCRIPT, GASP, GPSS, SIMULA, algunos usos son: Simulación de un sistema telefónico,de una tienda de autoservicio, de una fábrica, de la avenida de un río, de un crucero urbano con semáforos,etc.

Los modelos continuos; DYNAMO, CSSL, SAS II (*) se llaman así porque el tiempo que es una variable independiente del sistema avanza en pequeños incrementos uniformes finitos. En este tipo de lenguajes todo el sistema se revalúa (digital o analógicamente) en cada intervalo de tiempo transcurrido. Desde este punto de vista la simulación continua se parece a la simulación analógica que resuelve sistemas de ecuaciones diferenciales.Al modelar, las ecuaciones expresan; la teoría de operación del sistema y una visión panorámica completa de las interelaciones causa-efecto durante el tiempo transcurrido

de las variables que intervienen.
Generalmente estos modelos requieren menos información que los discretos pero necesitan de un estudio muy profundo de los mecanismos actuantes.

* Simulador Analógico desarrollado en el Instituto de Ingeniería, codificado en ALGOL para la Burroughs 6700.

III. EL COMPILADOR "DYNAMO"

DYNAMO es un compilador para traducir y correr modelos continuos que han sido descritos por un conjunto de -- ecuaciones diferenciales. El compilador fue desarrollado por el grupo de dinámica industrial en el Instituto Tecnológico de Massachussets para realizar simulaciones de negocios, modelos económicos y modelos de sistemas sociales y actualmente se usa para simular cualquier sistema continuo.

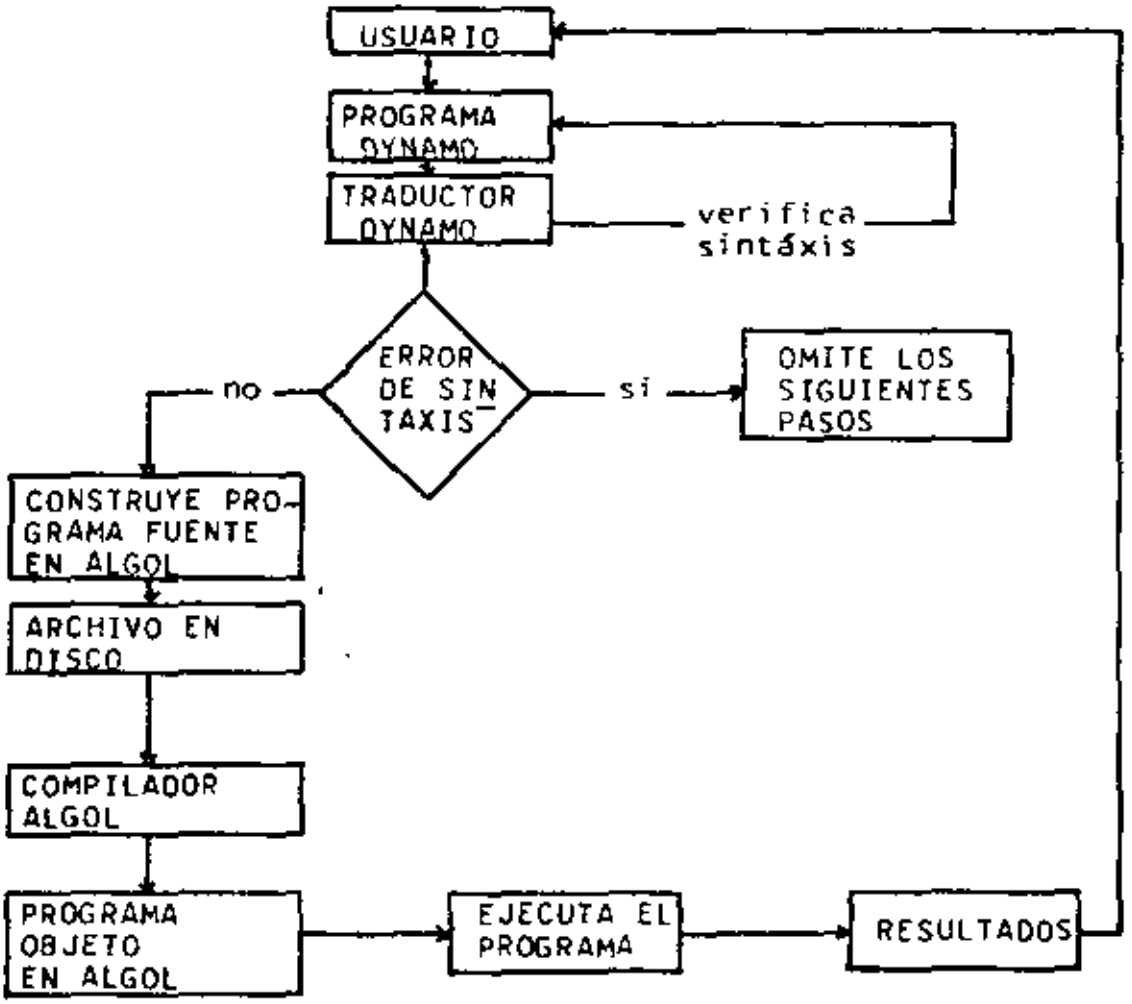
DYNAMO se diseñó para personas cuya principal actividad es la de resolver problemas, dirigiendo sus esfuerzos básicamente a esta actividad evitando distracciones en complejos requerimientos computacionales.

DYNAMO aparece originalmente según Alexander L. Pugh III como un programa llamado SIMPLE (Simulation of Industrial Management Problems) fue escrito por Richard K. Bennet en 1958 para una IBM 704. El modelo evolucionó en 1959 apareciendo como DYNAMO de DYNamic MOdels y fue escrito por el Sr. Phyllis Fox y la Sra. George Sternlieb y el Sr. Alexander L. Pugh III.
En 1962 el Sr. Jay W. Forrester modificó el paquete naciéndolo compatible para operar en tiempo compartido ; esto hizo posible crear, corregir y correr el modelo en pocas horas.
En 1965 se escribió otra vez DYNAMO eligiendo como lenguaje fuente el ALGOL AED (Algol Extended for Design) pues en ese entonces era uno de los lenguajes suficientemente poderoso y disponible en el Tecnológico de Mass.
DYNAMO II se diseñó para aceptar modelos escritos con DYNAMO I con muy pocos cambios.
Como respuesta a la demanda en 1971 se desarrolló una

versión de DYNAMO interactiva; durante la simulación, el usuario puede examinar el estado del sistema simulado y decidir acciones que él considere apropiadas, se conoce como GAMING DYNAMO.
Para responder al creciente número de modelos que tienen sectores que se repiten varias veces con objeto de representar la realidad de una manera más desagregada se le añadió la capacidad de manejar arreglos vectoriales. Este lenguaje se conoce como DYNAMO III.
En 1976 se comenzó a desarrollar DYNAMO para implementarlo en minicomputadoras.

IV PROCESAMIENTO DYNAMO

El programa DYNAMO que el usuario diseña es leído por el traductor DYNAMO que verifica la sintáxis y construye un programa fuente en ALGOL creando un archivo en disco. Después de terminar el trabajo anterior el traductor DYNAMO se conecta (ZIP) al compilador ALGOL para realizar la compilacion del código emitido. El compilador ALGOL compila el programa fuente resultando un código o programa objeto que al ejecutarse nos presenta los resultados.



Para el uso de DYNAMO se requieren de dos elementos básicos, el que llamaremos teórico y el que llamaremos mecánico.
El teórico se refiere a cómo realizar la investigación para resolver problemas, cómo plantear los problemas, cómo concebir el modelo, cómo calcular los parámetros, cómo elegir las variables, cómo realizar los análisis de sensibilidad, etc.
El otro aspecto, el mecánico, se refiere a cómo introducir los datos a la computadora para simular el problema.
Analizaremos brevemente el elemento teórico:
En la solución de problemas generalmente se tienen dos aspectos, solución a problemas no sociales y solución a problemas sociales. La solución a problemas no sociales se realiza planteando ecuaciones con incógnitas, que al ser resueltas y encontradas las incógnitas queda resuelto el problema. En estos casos la simulación se usa cuando las condiciones para las que se obtuvieron las ecuaciones cambian con el tiempo y el problema requiere de una solución dinámica, encontrándose una gama de valores que resuelven el problema en el tiempo.

Cuando los problemas son sociales la técnica varía y lo que se requiere como solución es realizar el planteamiento siendo éste la solución. Estos casos también pueden ser resueltos por simulación, pués la estructura del modelo se va formando con el sistema causa-efecto hasta llegar a modelar o formar a la medida del problema una estructura DYNAMO o sea un modelo dinámico de simulación que nos represente la realidad, y que nos permita estudiarla haciendo experimentos determinados según las necesidades.
Ya sea que se trate de problemas sociales o no sociales en general se sigue la siguiente secuencia:

1. Modelo Anecdótico. Es una descripción verbal sintetizada del problema, donde se destacan los principales mecanísmos, las variables, los paramétros, etc.

2. Diagrama Causal. Es un diagrama donde se interrelacionan las principales variables usando flechas y un signo + o - que indica si las variables interrelacionadas crecen o decrecen en el contexto del modelo.

3. Diagrama de Flujo DYNAMO. Se forma con la nomenclatura DYNAMO cómo se verá posteriormente. Permite observar claramente el camino que siguen los flujos dentro del sistema ilustrando las tasas, los niveles, los canales de información, los flujos de insumos o productos o personas o dinero etc. El diagrama permite realizar una rápida verificación de la lógica del sistema y apreciarlo globalmente.

4. Ecuaciones DYNAMO. Son las ecuaciones que forman el programa DYNAMO y que se deducen con ayuda del diagrama anterior.

5. Variación de Parámetros o Análisis de Sensibilidad. Generalmente se puede realizar en una misma corrida dando instrucciones que indiquen que al terminar la primera corrida continúe corriendo una segunda o tercera vez o más pero con algunos parámetros modificados.

6. Modificaciones al Modelo y Ajustes de Escalas. El modelo puede modificarse una vez hechas las primeras corridas para lograr algún objetivo, el rango de las escalas puede ajustarse para que las gráficas queden acotadas según nuestros deseos y/o agrupadas en las mismas escalas.

7. Validación del Modelo. Se refiere a hacer que el modelo repase valores históricos conocidos que sabemos ocurrieron, esto con una corrida simulando el periodo histórico; la validación o calibración consiste en adecuar el modelo de tal forma que represente el período histórico. Este aspecto no siempre se realiza, pues al tratar de pronosticar el futuro si la historia del fenómeno no se conoce difícilmente podrá realizarse la calibración o validación.

Veamos ahora el elemento mecánico. Una herramienta básica de la simulación es el proceso de integración. La integración aparece en toda la naturaleza y es esencial para representar el proceso de cambio en los sistemas. Es el proceso que relaciona una cantidad con su tasa de cambio temporal. Se puede pensar que la distancia recorrida por un vehículo en un cierto tiempo es la integral en todo el intervalo de la función que represente la tasa de cambio de posición del vehículo. Veamos un ejemplo: Si un automóvil se mueve a una velocidad constante de 60 km/hora en 4 horas habrá recorrido 240 km. Esto podemos calcularlo así:

$$\frac{ds}{dt} = 60 \; ; \quad ds = 60\,dt \quad ; \quad S = \text{int}_0^4\, 60\,dt.$$

$$S = 60\,(\,t\,)\,\Big|_0^4 = 240$$

DYNAMO usa otra forma para resolver el mismo problema: La ecuación computacional que usa llamada de nivel es del tipo:

RECORRIDO ACTUAL = RECORRIDO ANTERIOR + TIEMPO TRANSC. X TASA DE CAMBIO

Para la primera hora tenemos:

S = 0 + (1 hora) X 60 = 60

Para la segunda hora:

S = 60 + (1 hora)X 60 = 120

Para la tercera hora:

S = 120 +(1 hora) X60 = 180

Para la cuarta hora:

S = 180 + (1 hora) X 60 = 240 km.

Esta forma de resolver el problema es más elaborada para este caso donde la tasa es constante. Si la tasa fuera variable, primero habría que encontrar la función que la represente en el tiempo y después integrarla para obtener el resultado. Si esta función no es sencilla el proceso de integración se dificulta y caeremos en lo que hace DYNAMO . Para cada intervalo de tiempo escogido considerará que la tasa es constante durante el intervalo e integrará . Si reducimos este intervalo lo suficiente tendremos una buena presición.

Para manejar el tiempo DYNAMO usa índices, J,K y L para indicar:

K. Hoy,este momento,este segundo, etc.

J. Ayer,el momento anterior,el segundo anterior,etc.

L. Mañana,el momento siguiente,el próximo segundo,etc.

JK Intervalo de tiempo de ayer a hoy,etc.

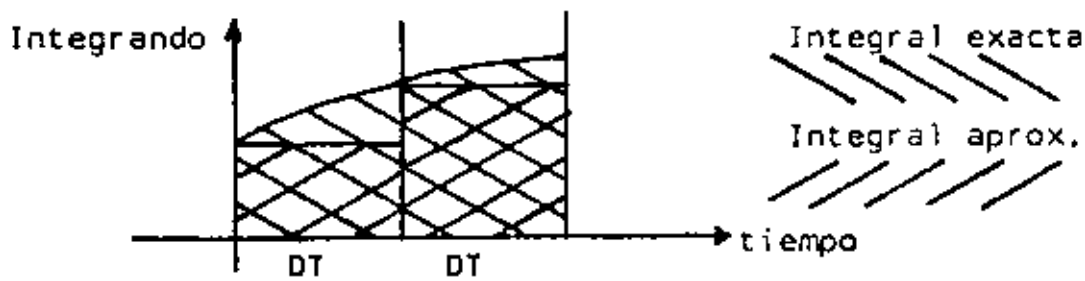
KL Intervalo de tiempo de hoy a mañana,etc.

Estos intervalos de tiempo tienen una medida que se llama DT (delta time). Usando esta notación la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

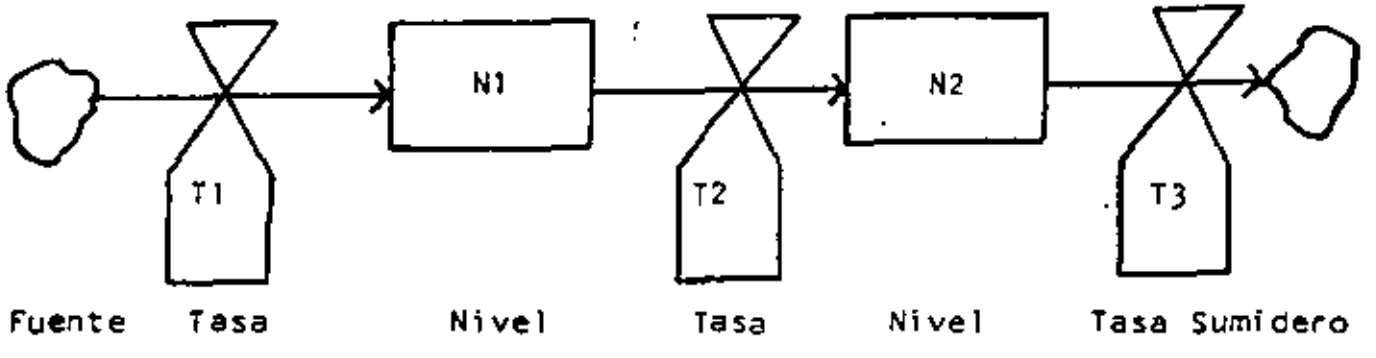
S.K=S.J+(DT)(V.JK)

donde V.JK = 60

V.JK es la tasa que en este caso la consideramos constante,si la tasa varía muy aprisa para tener cierta exactitud debemos operar la ecuación digamos cada minuto o cada segundo depende de que tan aprisa varíe V.Y consideraremos constante la tasa en el intervalo reducido, se puede resolver con la exactitud que se quiera basta escoger a DT muy pequeño.



Tasa de sistemas donde el flujo se conserva:
El ejemplo del automóvil es típico, así como el caso del flujo de algún líquido a un tanque, el flujo de personas a una población, el flujo de corriente eléctrica a un condesador, el flujo de tareas en una fábrica, etc. En cada caso existe un flujo que se mueve sin ser creado o destruido en el proceso. Las partes de nuestros modelos que tienen esta característica las identificaremos como subsistemas que se conservan y llamaremos a estos flujos tasas. En estos sistemas las tasas de cambio de los niveles toman la forma de simples sumas o diferencias de tasas. Hay una forma típica en que aparecen dos niveles que son controlados por tasas. El nivel N1 es alimentado por la tasa T1, pero a la vez la tasa T2 le quita y alimenta a N2 que a su vez es disminuido por la tasa T3. En estos casos en que la tasa siempre se añade, pero nunca se resta, se considera que la tasa fluye hacia dentro del sistema desde una fuente exterior que podemos considerar como el límite de nuestro sistema. Si la tasa siempre se resta y nunca se añade entonces esta fluyendo a un sumidero exterior que también marca una frontera del sistema. Veamos la representación gráfica.



Las ecuaciones correspondientes son:

N1.K=N1.J+(DT)(T1.JK-T2.JK)

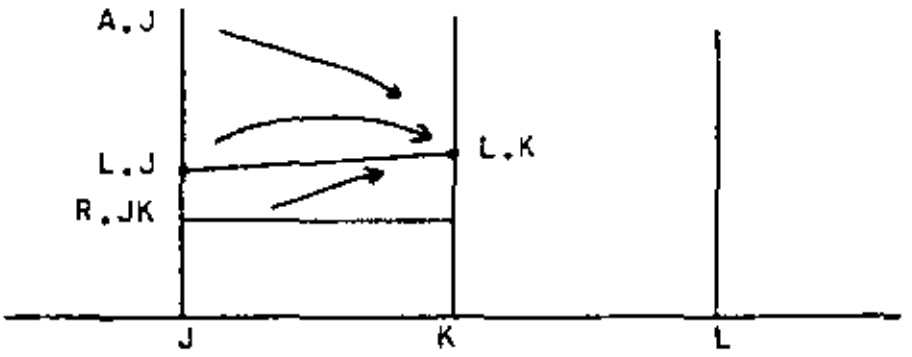
N2.K=N2.J+(DT)(T2.JK-T3.JK)

Las tasas se calculan en el instante K para usarse en el intervalo KL . Este cálculo se realiza con una expresión

algebraica de variables en el mismo instante K.
Sistemas en donde no se conserva el flujo: Contiene relaciones integrales y algebraicas. Las integrales se calculan con las ecuaciones de nivel pero las tasas de cambio de los niveles son más complicadas que la suma de varias tasas.
En los subsistemas, donde no se conservan los flujos, las relaciones algebraicas simples se calculan con ecuaciones auxiliares. Estas se calculan en el instante K a partir de los niveles y otras ecuaciones auxiliares. Como DYNAMO no acepta ecuaciones simultáneas es necesario ordenar los cálculos de las ecuaciones auxiliares de tal forma que un auxiliar se calcule antes de ser requerido en otra ecuación auxiliar, si DYNAMO no encuentra un orden para hacer esto, manda un mensaje de error que dice ECUACIONES SIMULTANEAS.

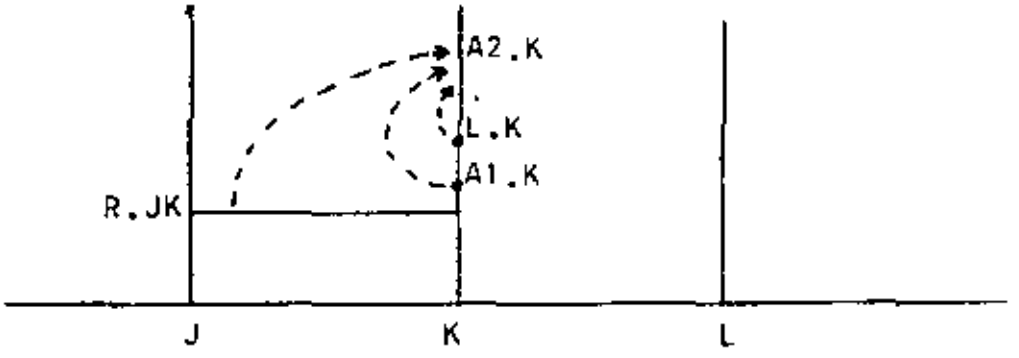
V. SECUENCIA COMPUTACIONAL

En el instante K se calculan primero todos los niveles, los que a su vez dependen de su valor previo en el instante anterior J y de las tasas calculadas para el intervalo JK . Como ya se hicieron los cálculos para J y JK no hay problemas para calcular los niveles.



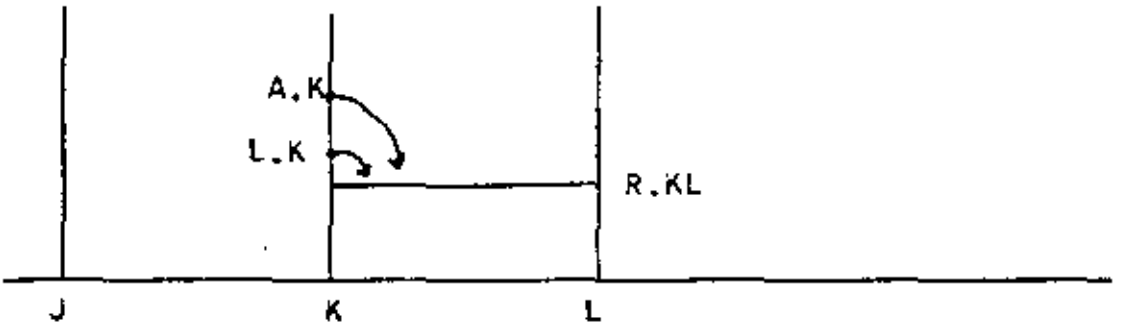
L.K=L.J+(DT)(R.JK-A.J)

Auxiliares: En seguida las ecuaciones auxiliares ordenadas automáticamente por DYNAMO se calculan para el instante K a partir de los niveles en K y otras auxiliares calculadas primero en K.



A2.K=(L.K)(A1.K)

Tasas : Finalmente se calculan las tasas para el intervalo próximo KL a partir de los niveles y las auxiliares en el momento K.



R.KL= L.K+A.K

En este momento cuando las tasas ya se han calculado el tiempo actual se avanza automáticamente DT unidades. Todas las cantidades que se calcularon para el tiempo K - ahora se considera que son valores en el tiempo J y las tasas calculadas para el intervalo KL ahora son tratadas como si fueran valores en el intervalo JK. Aquí se repite el ciclo comenzando de nuevo con los niveles.

VI. NOMENCLATURA DE LOS DIAGRAMAS DE FLUJO

NIVEL

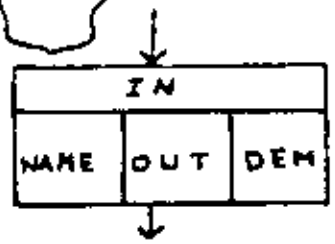
TASA

AUXILIAR

FUENTE

SUMIDERO

DEMORA



PARAMETRO

INFORMACION

BIENES

ORDENES O PEDIDOS

DINERO

PERSONAS

EQUIPO

VII. ESCRITURA DE ECUACIONES

Las reglas para formar una ecuación son las usuales del álgebra, la forma básica es :

tipo de ec. cant=expresión (a partir de la col. 7)

Los tipos de ecuaciones pueden ser :

Tipo	Símbolo
De Nivel	L
Auxiliares	A
De Tasa	R
De Valor Inicial	N
Constante	C
Tabla	T
Suplementaria	S

En DYNAMO I era necesario indicar el tipo de ecuación, pero en el sistema implantado actualmente no es necesario. "cant" es el nombre de la cantidad que esta siendo definida por la ecuación. El nombre debe cumplir las reglas para formar nombres y debe tener el índice apropiado de tiempo . Todo nombre de una cantidad debe comenzar con un carácter alfabético, y puede ser seguido por hasta cinco caracteres alfábeticos o numéricos,(en la versión actual se permiten hasta 63 caracteres,pero al imprimir sólo apareceran los seis primeros,sólo deben usarse dígitos de hasta seis cifras). "expresión" puede ser cualquier cosa desde un simple número hasta una combinación de factores y términos que involucren funciones.

Las operaciones de suma,resta,multiplicación y división se indican por + , - , ( ) , / , se usan las jerarquías comunes: Multiplicación y división se realizan primero que suma y resta.Los paréntesis significan que la expresión dentro de ellos debe calcularse y sustituirse por ellos.

A+BXC implica A+((B)(C))

Si las operaciones son del mismo valor jerárquico se realizan en orden de izquierda a derecha:

A-B+C implica (A-B)+C

Debe tenerse cuidado en el caso de la multiplicación y la división. Si se desea dividir X entre el producto de Y y Z debe escribirse:

X/Y/Z

DYNAMO interpreta X/(Y)(Z) como (X/Y)(Z)

Los valores numéricos se escriben en la forma usual. Se pueden usar hasta seis dígitos significativos. Números muy grandes o muy pequeños se pueden escribir indicando potencias de 10 multiplicadas por el número con la letra E: 10 000 000 = 10E6 = 1E7

.001 = 1E-3

En DYNAMO es posible crear subrutinas llamadas MACROS cuando se tienen sectores del modelo que son repetitivos. Esto evita tener que escribir un conjunto de ecuaciones varias veces para cada sector ,basta declararlo una vez definirlo y cuando se necesite introducir los valores en la función MACROS,esto equivale a volver a escribir las ecuaciones del sector con sus nuevos valores.

Existen varias funciones y macros ya creadas dentro de DYNAMO que corresponden a las siguientes categorías:

a) Intrínsecas que modelan curvas llamadas DELAYN
b) Intrínsecas computacionales que son: SIN,COS,SQRT, LOGN,EXP y SUMN.
c) Intrínsecas controladas por el tiempo: BOXLIN,BOXCYC, PULSE,RAMP,SAMPLE,STEP.
d) Intrínsecas de selección de valores: CLIP,MAX,MIN, SWITCH y TABLE.
e) Intrínsecas aleatorias: NOISE y NORMRN.

Ecuaciones de Nivel: Matemáticamente indican integración. Una ecuación típica de nivel es de la siguiente forma:

L.K=L.J+(DT)(R1.JK-R2.JK)

L.K es el nombre,el índice K indica que el valor es leído en el presente. El lado derecho de la ecuación usa el

mismo valor L, pero con el índice J para indicar que se trata del valor de L en el periodo anterior, más el intervalo de tiempo transcurrido.DT desde la última evaluación multiplicado por una expresión que considera el valor del cambio del nivel en el lapso DT o sea la tasa.

REGLAS PARA COLOCAR INDICES EN LAS ECUACIONES DYNAMO								
LADO IZQUIERDO			INDICE DE LA CANTIDAD DEL LADO DERECHO SI EL TIPO ES:					
TIPO	CANTIDAD	INDICE	L	A	R	S	C	N
L	NIVEL	K	J	J	JK	-	-	-
A	AUX.	K	K	K	JK	-	-	-
R	TASA	KL	K	K	JK	-	-	-
S	SUPL.	K	K	K	JK	K	-	-
C	CTE.	-	-	-	-	-	-	-
N	VAL. INIC.	-	-	-	-	-	-	-

Ecuaciones de tasa: Esta ecuación define el tamaño del flujo entre variables de nivel y una fuente, un sumidero u otra variable de nivel. Una ecuación típica de una tasa es:

R.KL=(L.K+R.JK)/L2.K

R.KL es el nombre de la tasa con índice KL para el intervalo de tiempo entre el presente y el futuro. El lado derecho es una expresión aritmética de variables de nivel , variables de tasa,variables DYNAMO o constantes. Las variables de nivel tienen el índice K o J, las variables de tasa del lado derecho tienen índice JK.

Ecuaciones Auxiliares: Al modelar puede querérsele dar un nombre a una expresión que se use en otra ecuación. La ecuación que asigna el nombre a la expresión se llama ecuación auxiliar . El índice usado es K .Un ejemplo de una ecuación auxiliar:

MAXT18.K=AM.K/DT

Ecuaciones Suplementarias: Como en el caso de la ecuación auxiliar la ecuación suplementaria le dá nombre a una expresión, pero para usarla en valores de salida como listado o gráficas por ejemplo:

H.K=VALOR.K-LIS

Ecuaciones constantes: Es una cantidad sin índice;

AB=1638

Ecuaciones de Valor Inicial: Si la ecuación tiene la forma de una ecuación constante, pero el nombre de la cantidad aparece en otro lugar del programa, se llama ecuación de valor inicial. Los valores iniciales sólo se requieren para las variables de nivel, sin embargo se pueden dar valores iniciales a otras variables. Se pueden realizar varias corridas con un mismo programa cambiando cada vez el valor inicial, por lo que se puede realizar diseño experimental en una corrida.

Sistema de tiempo y unidades: Al calcular los valores del programa se usan unidades tales como unid/mes o u/sem etc, las unidades no se dan en unid/DT. Es recomendable hacer la unidad de tiempo del sistema un múltiplo del intervalo de solución DT. Si DT no es un múltiplo de la unidad de tiempo del sistema, hay problemas para elegir el valor de DT para imprimir o graficar, DYNAMO lo resuelve usando el valor que tenga la variable justo antes y dentro de un intervalo de DT/2 del tiempo transcurrido.
Los tiempos de impresión o graficación PRTPER y PLTPER se expresan en unidades de tiempo del sistema así mismo LENGTH.
EJEMPLO: Las siguientes instrucciones quieren decir:

```
columna
1       7
SPEC    DT=1/LENGTH=10/PRTPER=2/PLTPER=3
```

La unidad de tiempo del sistema es 1, la simulación se realizará durante 10 unidades de tiempo, las variables que

se grafiquen serán cada 2 unidades de tiempo y las gráficas tendrán un punto cada 3 periodos.
Si DT=0.2, LENGTH=10 , PLTPER=.2 y PRTPER=0
Quiere decir: Se haran cálculos cada .2 unidades de tiempo simulándose durante 10 unidades de tiempo se graficará cada .2 unidades de tiempo y no habrá lista (PRTPER=0).
O sea, si la unidad del sistema es el segundo:
DT=.1 segundos, LENGTH=10 segundos, etc.

Es conveniente elegir a DT en un intervalo práctico que vá de 1/3 a 1/5 del valor del tiempo más pequeño dentro del modelo. Una vez que el modelo se ha probado y está corriendo se puede aumentar el valor de DT para ahorrar tiempo de procesamiento.

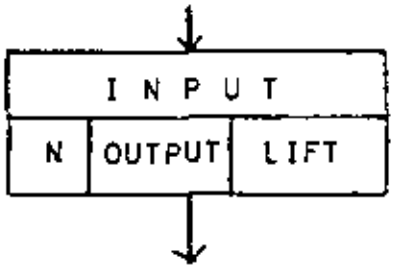
Símbolos de Graficación: Las escalas tienen un rango de 10^{-33} a 10^{33} los siguientes símbolos se usan en las escalas que DYNAMO automáticamente escoge para graficar.

SIMBOLO	K	Y	W	U	L	J	H
MULTIPLO	$<10^{-30}$	10^{-30}	10^{-27}	10^{-24}	10^{-21}	10^{-18}	10^{-15}
SIMBOLO	G	F	E	A	X	T	M
MULTIPLO	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{0}	10^{3}	10^{6}
SIMBOLO	B	R	Q	V	S	P	C
MULTIPLO	10^{9}	10^{12}	10^{15}	10^{18}	10^{21}	10^{24}	10^{27}
SIMBOLO	N	D	Z				
MULTIPLO	10^{30}	10^{33}	$>10^{33}$				

VIII FUNCIONES INTRINSECAS

DELAYN.

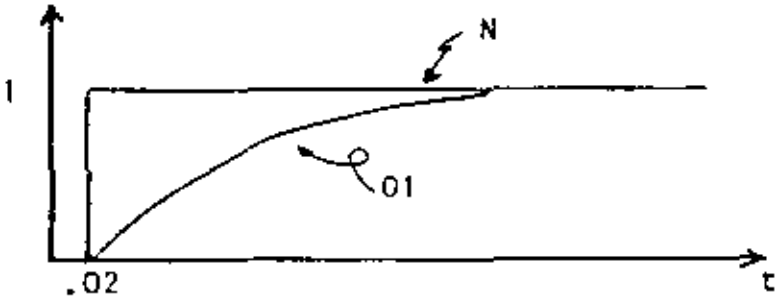
Alteran la tasa de flujo que se mueve en el sistema,no añaden ni restan nada sólo retardan el flujo,las demoras pueden ser de varios ordenes de 1 a 5,DELAY1 a DELAY5 el orden de la demora coincide aproximadamente con la pendiente,cuando se aplica la demora a una función escalón al aumentar el orden la demora es menor. El símbolo para la demora es:



- Una demora de orden N significa que la demora promedio LIFT se reparte en N intervalos consecutivos del sistema cuando este es estable. EJEMPLO:

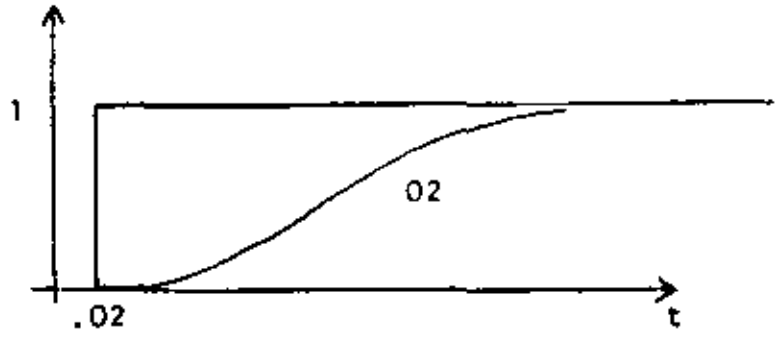
Demora de primer orden:

```
O1.kl=O1.JK+(DT)(N.JK-O1.JK)/DEM
DEM=5
N.KL=STEP(1,0.02)
```



Demora de segundo orden:

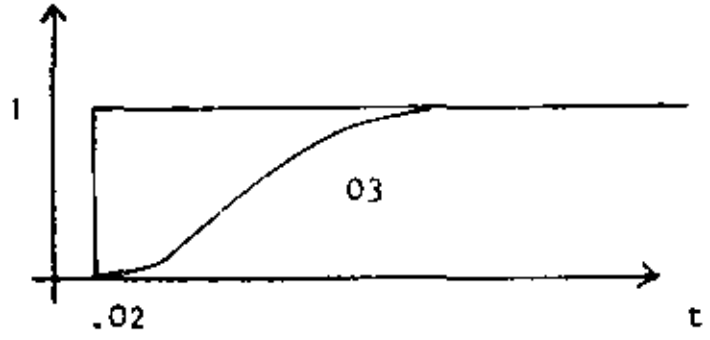
```
O2.KL=O2.JK+(DT)(R.JK-O2.JK)/DEM
R.KL=R.JK+(DT)(N.JK-R.JK)(2)/DEM
```



Demora de tercer orden:

03.KL=DELAY3(N.JK,DEM)

De la demora de tercer orden hasta la de quinto orden se pueden escribir como la anterior ya que DYNAMO tiene definida interiormente esta función.



SIN,COS,SQRT,LOGN,EXP,SUMN.

SIN.

Calcula la función seno; se introduce a la máquina como:

VALOR=(AMPLITUD)(SIN((2PI)(TIME.K)/PERIOD))

Por ejemplo para representar la función con una amplitud de 30 y un periodo de 20:

I.KL=(30)(SIN((2PI)(TIME.K)/P))

P=20

COS.

Es igual que SIN, pero se usa COS

SQRT.

VALOR=SQRT(ARG)

El valor del ARG debe ser mayor o igual a cero.

por ejemplo:

$N1*=x_1/x_2/x_3/x_4$

$N2*=y_1/y_2/y_3/y_4$

$N3*=z_1/z_2/z_3/z_4$ entonces VALOR será :

$VALOR=x_1y_1z_1+x_2y_2z_2+x_3y_3z_3+x_4y_4z_4$

BOXLIN,BOXCYC,PULSE,RAMP,SAMPLE,STEP

BOXLIN.

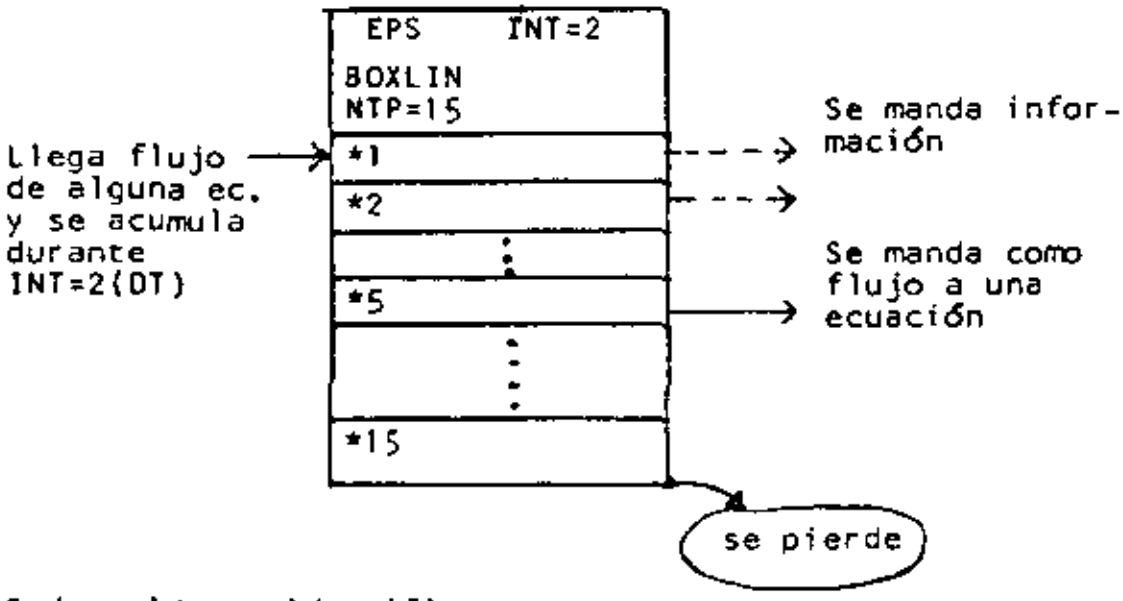
Especifica una progresión lineal descartando el último término:

EPS=BOXLIN(NTP,INT)

EPS es el nombre que se le da a la progresión.

NTP es el número de términos de la progresión.

INT es el intervalo después del cual la progresión se corre,descartando el último valor.



Cada celda se identifica como:

EPS*1 , EPS*2 .... EPS*15-

También puede dársele valor a las celdas con:

EPS*=N1/N2/..... /NM

o con:

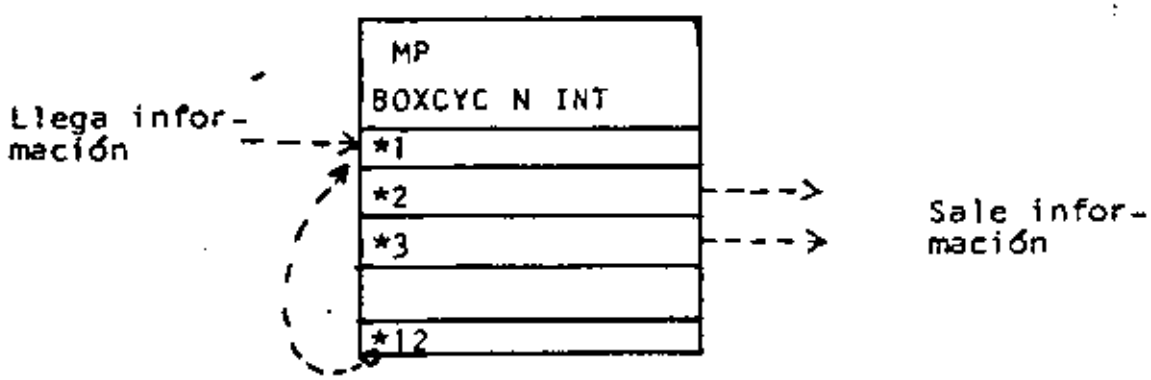
EPS=BOXLOAD(VAR1,VAR2)

Esta última ecuación ocasiona que todas las celdas se carguen con el producto de VAR1 · VAR2 , si queremos cargar una celda en especial por ejemplo la 5,usamos:

EPS*5.K=EXPRESION.

BOXCYC.

Es análoga a BOXLIN salvo que en lugar de descartar el último valor de la progresión,lo recircula de la última celda a la primera. Se carga igual que BOXLIN



Recicla la última celda

MP=BOXCY(N,INT)

PULSE.

VALOR=PULSE(±HEIGHT,FIRST,INTERVAL)

Esta intrínseca hace que VALOR cambie súbitamente de cero a (±HEIGTH)(DT) y otra vez a cero comenzando en el instante FIRST y cada periodo de tiempo INTERVAL. HEIGTH, FIRST y INTERVAL pueden ser constantes o variables.

RAMP

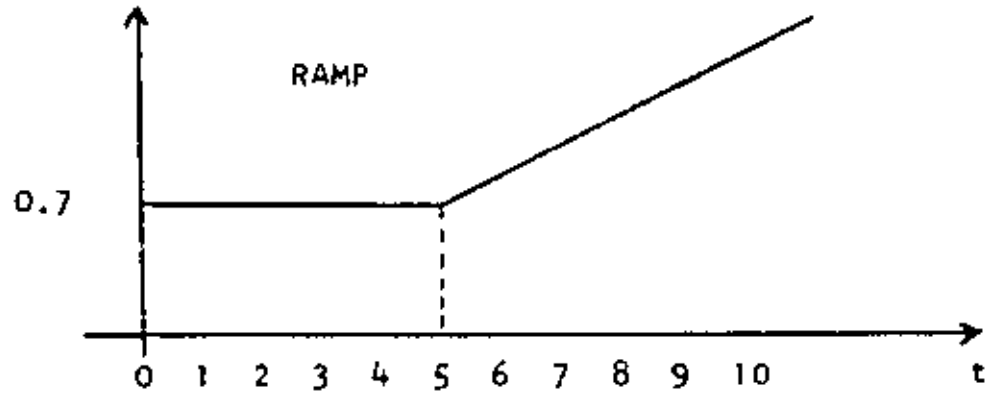
VALOR=RAMP(±SLOPE,STARTTIME)

RAMP tiene un valor constante hasta el momento STARTTIME en el que empieza a crecer ±SLOPE cada DT.

En el caso de que se quiera que tenga un valor inicial de 0.7 y que en el tiempo 5 empiece a crecer se tendrá:

RMP.K=0.7+RP.K

RP.K=RAMP(1,5)



SAMPLE.

VALOR=SAMPLE(SUB,INT)

Se puede dar valor inicial a SAMPLE de otra forma vale cero hasta que el tiempo de simulación llega a INT en ese momento toma el valor de SUB.

Ejemplo:

S=SAMPLE(R,10)

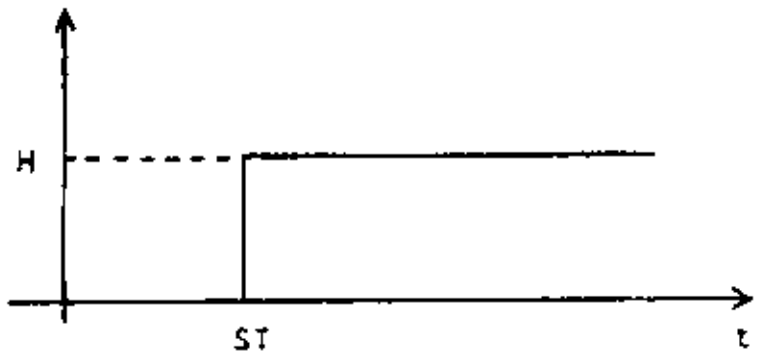
R.K=RAMP(0.1,10)

Cuando el tiempo =0, S=0 durante 10 periodos,cuando t=10 S= al valor que tenga R en el instante t=10, y este valor lo conserva durante 10 periodos de tiempo al final de estos 10 periodos S toma el valor que tenga R en ese instante y lo conserva 10 periodos, etc,etc.

STEP.

VALOR=STEP(±H,ST)

VALOR adquiere el valor ±H en el momento ST y lo conserva hasta finalizar la simulación.



CLIP,MAX,MIN,SWITCH,TABLE

CLIP.

VALOR=CLIP(V2,V1,A2,A1)

VALOR=V1 si A1 > A2

VALOR=V2 si A1 ≤ A2

MAX.

VALOR=MAX(A1,A2)

Elige el valor máximo A1 o A2 si A1=-A2 :

VALOR=valor absoluto.

MIN.

VALOR=MIN(A1,A2)

Elige el valor mínimo.

SWITCH.

VALOR=SWITCH(VAR1,VAR2,ARG)

VALOR=VAR1 si ARG=0

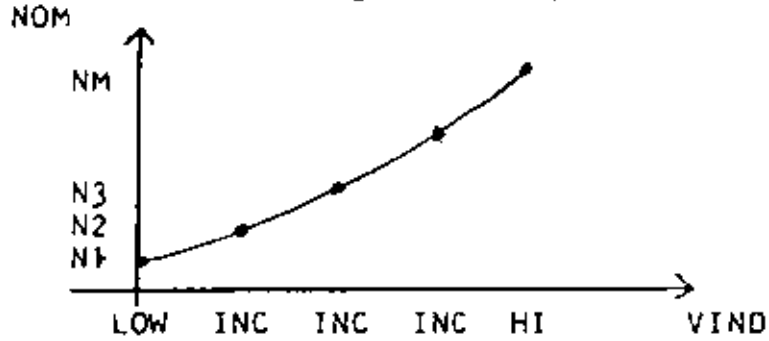
VALOR=VAR2 si ARG≠0

TABLE.

VALOR=TABLE(NOM,VIND,LOW,HI,INC)

NOM*=N1/N2/...../NM

Esta intrínseca permite hacer una gráfica NOM ∀ VIND en donde VIND tiene un valor mínimo de LOW y un valor máximo de HI y la escala (eje de las x) tiene valores de incremento de INC en INC. A cada valor de VIND corresponde un valor de NOM en el eje de las yes.



Para valores intermedios la máquina interpola linealmente.

Los valores con los que se entra a la tabla son los de VIND y sale con valores de NOM.

NOISE,NORMRN

NOISE.

Es una función uniformemente distribuida que puede usarse como muestra de ruido blanco.

VALOR=(RANGO)NOISE

Da un valor pseudoaleatorio en el rango de -RANGO/2 a +RANGO/2 .

Ejemplo: UNIFORM=(10)NOISE

Esta ecuación da variables aleatorias en el intervalo -5,5 para generar estos valores existe un método standar congruente,siempre que se invoque esta función dará los mismos números aleatorios si queremos que los cambie usamos: NOISE=N N es un número entero menor que: 549755813888.

NORMRN.

Genera variantes pseudoaleatorias a partir de la distribución de Gauss con una media= MEAN y una desviación estandar=ST y tiene la forma:

VALOR=NORMRN(±MEAN,ST).

IX. FUNCIONES MACRO

Cuando al modelar se encuentra un patrón en la forma de las ecuaciones,o sea que se encuentran varios conjuntos de ecuaciones exactamente del mismo tipo,pero con diferentes valores,entonces es conveniente declarar una función MACRO y sólo definir los diferentes valores cada vez que se necesite. Una declaración MACRO requiere de tres elementos básicos; la palabra MACRO y después de dejar un espacio la función,ejemplo:

```
COLUMNA
1      7
MACRO SMOOTH(IN,DEL)
```

A continuación el conjunto de ecuaciones y al final la palabra MEND a partir de la primera columna; las variables que se encuentran en la función se escriben igual en la declaración MACRO;pero si aparecen otras variables en el conjunto de ecuaciones (llamadas variables locales) deben empezar con el signo $. Veamos un ejemplo:

```
MACRO DELAY(IN,DEL,L1,L2,L3)
      L1.K=L1.J+(DT)(IN.JK-$R1.JK)
      $R1.KL=L1.K/$DLY.K
      L2.K=L2.J+(DT)($R1.JK-$R2.JK)
      $R2.KL=L2.K/$DLY.K
      DELAY.K=$R3.JK)
      $DLY.K=DEL.K/3
      L1=($DLY)(IN)
      L2=L1
      L3=L1
MEND
```

para llamar a una función MACRO y encontrar su valor para poder usarlo en algún otro lado:

```
V.K=DELAY(IN,DEL,L1,L2,L3)
```

pero ya con los valores numéricos de IN,DEL,L1,L2,L3 .

X INSTRUCCIONES Y TARJETAS DE CONTROL PARA PROCESAR DYNAMO.

1.Para procesar a través de tarjetas:

A Tarjetas de control 1a. parte.

B Programa DYNAMO

C Tarjetas de control 2a. parte.

A:

```
COLUMNAS
1      7
?JOB CUALQNOMBR;USER=FM98/CL;CLASS=3;BEGIN
?EXECUTE *DYNAMO/DISK;
?EBCDIC DYNAMOINPUT
```

B: Programa DYNAMO:

La primera tarjeta es el nombre de un archivo de referencia del programa fuente en ALGOL CON SIETE CARACTERES o menos:

```
COLUMNA
1      7
PREFIJO/SUFIJO1                          tarjeta 1.
```

La siguiente tarjeta tiene las opciones DYNAMO

```
COLUMNA
1      7
DYNAMO NOZIP OPCION OPCION OPCION        tarjeta 2.
```

Las opciones que maneja DYNAMO son:

NARROW.

Las gráficas de salida y las listas se imprimen en un formato angosto de 72 columnas, esto limita el número de columnas en las listas a 8.

WIDE.

Da una impresión de 120 columnas y se pueden usar hasta 14 columnas de listas. Puede graficarse hasta 10 variables por gráfica.

DLIST.

Esta opción hace que aparezcan impresas las ecuaciones del modelo cuando se procesa por terminal.

CODE.
Enlista el programa fuente que DYNAMO creó en ALGOL
DUMP.
Imprime la estructura de información que maneja DYNAMO para el programa en cuestión.
NOZIP.
Nada más se usa en BATCH inicia un ZIP (conecta) al compilador ALGOL siempre y cuando no se hayan detectado errores.
Las opciones se pueden colocar en las columnas de la 7 a la 72, cuando se usa más de una opción se pueden colocar en la misma tarjeta separadas por un espacio en blanco, las tarjetas o tarjeta de opciones pueden colocarse en cualquier lugar del programa.

La siguiente tarjeta tiene RUN en las primeras tres columnas y a partir de la séptima un nombre que empiece con carácter alfabético y de hasta 72 caracteres, en las impresiones sólo aparecen los 6 primeros caracteres.

```
COLUMNAS                                    tarjeta 3:
1      7
RUN    CUALQUIERNOMBRECON72CARACTERESSOLOIMP6
```

Después del RUN comienzan las ecuaciones DYNAMO.
NOTA. Para introducir comentarios en las ecuaciones basta dejar un espacio después del último carácter y escribir cualquier comentario, número o símbolo hasta la columna 72 inclusive o escribir una tarjeta con los caracteres NOTE a partir de la primera columna y escribir lo que se quiera a partir de la séptima columna, si no se escribe nada en los listados aparece un renglón en blanco, o sea que las ecuaciones correspondientes a la tarjeta anterior y posterior a la que tiene NOTE aparecen separadas por un renglón en blanco.

Si se quiere realizar pruebas con el modelo cambiando el valor de los parámetros,esto puede hacerse colocando otro RUN con otro nombre al final del programa DYNAMO anterior y a continuación tarjetas con los valores de los parámetros nuevos,no se permite cambiar variables ni tablas en estas corridas sucesivas,resumiendo:

```
PREFIJO/SUFIJO1
DYNAMO NOZIP NARROW
RUN   PROGRAMA  PARA EL CURSO QUE SE IMPARTIRA ..
NOTE
NOTE
       Aquí se inserta el programa con sus ecuaciones.

RUN   OTRACORRIDA  VAMOS A MODIFICAR PARAMETROS.
NOTE
      PARAMETRO=8
RUN   OTRADIFERENTE
      PARAMETRO=15
```

C. Tarjetas de control 2a. parte.

```
COLUMNA
1     7
?COMPILE NOMBCUALQ    ALGOL;
ALGOL PROCESS=200;ALGOL IO=200;
PROCESS=200;IO=200;
?EBCDIC CARD
  $SET BCL MERGE FORMAT
TARJETA EN BLANCO
TARJETA EN BLANCO
?REMOVE PREFIJO/SUFIJO1
?END JOB
```

NOTA. Después de JOB y COMPILE puede aparecer cualquier cosa de uno a diez caracteres, el nombre del listado que sale por la impresora en letras grandes es el que se haya colocado después de JOB.

.....

2. Para procesar por terminal:

Existen dos formas:

A. Introducir el programa con tarjetas perforadas y mandar a ejecutarlo desde la terminal.

B. Escribir el programa directamente en el teletipo.

Para introducir las tarjetas según A hay dos formas.
La primera consiste en introducir las tarjetas para que sean leídas, ir a la terminal y mandar ejecutar el programa con la instrucción:

```
EXECUTE *DYNAMO/DISK
```

Una vez realizada esta instrucción se espera en la impresora de línea los resultados.
La segunda consiste en usar las siguientes tarjetas de control para que se forme un archivo en disco (DATA)

```
COLUMNA
1      7
?JOB INF  ;USER=AP82/PN;CLASS=3;BEGIN
?RUN *SYSTEM/DUMPALL("CRDDSK N1 N2");
DATA N1
    :
    :
    :
?END JOB
```

Al procesar el programa por terminal debe usarse la instrucción REMOTE a partir de la primera columna en una sola tarjeta en lugar de PREFIJO/SUFIJO1 .

Una vez leídas las tarjetas anteriores o escritas directamente en el teletipo se procede como sigue:
Se forma un archivo que se llame DYNAMOINPUT con las instrucciones CANDE siguientes: MAKE DYNAMOINPUT SEQ , se escriben las ecuaciones del programa en este archivo y se guarda con la instrucción SAVE.
Si se usan las tarjetas el archivo aparece con el nombre N2 y se le cambia el nombre de la siguiente manera:

```
TITLE N2 TO DYNAMOINPUT
```

Después de esto se guarda (SAVE) y cuando la computadora conteste:

```
# DYNAMOINPUT SAVED
```

Damos la siguiente instrucción:

EXECUTE *DYNAMO/DISK

y la máquina contesta:

#RUNNING

después de poco tiempo aparece en la pantalla:

#?

ENTER IN COLUMNS 1-15 THE NAME OF THE DISK FILE YOU WISH DYNAMO TO CREATE TO WRITE YOUR ALGOL SOURCE CODE. IF OUTUT IS DESIRED ON THE LINE PRINTER ENTER C IN COLUMN 1 FOLLOWED BY FILENAME.

Entonces se escribe el nombre de este archivo:

PREFIJO/25 o lo que se quiera.La máquina contesta:

OK

(Si en las opciones DYNAMO colocamos DLIST aparece un listado de nuestras ecuaciones corregido por DYNAMO si es que encontró errores si no hubo errores aparece sólo la lista)

BURROUGHS B6700/B7700 DYNAMO LEVEL DYN 454: la fecha

IMPUT PHASE BEGIN AT la hora.

Después de un cierto tiempo aparece el listado del programa DYNAMO,el primer renglón es la tarjeta DYNAMO.

Aún cuando no se haya especificado DLIST y haya o no errores DYNAMO contesta:

```
INPUT PHASE BEGAN AT ..........
GENERATION PHASE BEGAN AT ......
RUN PHASE GENERATED AT .........
PRINT PHASE GENERATED AT .......
PLOT PHASE GENERATED AT ........
ELAPSED COMPILATION TIME .......
```

Si hay errores aparece un aviso diciendo que las siguientes fases serán omitidas.

Si se colocó la letra "C" antes del nombre del archivo aparece el letrero:

```
PLEASE RECEIVE YOUR OUTPUT AT THT LINE PRINTER
ET= ____ PT= ____ IO= ____
```

Si no se puso la letra "C" aparece el siguiente mensaje:

PLEASE ENTER COMPILE (el nombre del archivo) WITH ALGOL. THEN WAIT UNTIL YOUR TERMINAL REPORTS THAT YOUR COMPILATION IS COMPLETE.AFTER GOOD COMPILATION,ENTER EXECUTE(EL NOMBRE DEL ARCHIVO)

```
ET=_____ PT=_____.IO=_____
```

entonces uno escribe en el teletipo:
COMPILE PREFIJO/SUFIJO1 WITH ALGOL y la máquina contesta:
#COMPILING
si no hubo errores aparece:
ET=..... PT=..... IO=.....
Entonces vuelve uno a escribir:
EXECUTE PREFIJO/SUFIJO1 y la máquina contesta:
#RUNNING
Después de un cierto tiempo aparece todo el programa en pantalla,esto si se usó DLIST si no sólo aparecen las listas y las gráficas. Si está uno en una terminal de rayos catódicos después de que se llena la pantalla aparece la leyenda PAGE que quiere decir que hay que apretar el RETURN del teletipo para que continúe,si está uno en un DECWRITER los resultados se irán escribiendo directamente. Si estamos en una terminal de pantalla y una vez obtenida la salida deseamos una impresión por la impresora de -- línea,damos la siguiente instrucción:

EXECUTE PREFIJO/SUFIJO1;FILE W9900(PRINTER),esto imprime sólo la salida,para imprimir el programa:

WRITE DYNAMOINPUT

XI. DESARROLLO DE UN EJEMPLO

Vamos a describir un proceso físico que consiste en el enfriamiento de agua caliente que se tiene en un calentador que está apagado, dicho calentador se encuentra en un cuarto a temperatura constante. Al enfriarse el agua se transfiere calor al cuarto a una rapidez que depende de la temperatura del agua, de su volumen y del material aislante que tiene el calentador. Este proceso continúa hasta que la diferencia entre la temperatura del cuarto y del agua sean iguales. Veamos como queda el modelo anecdótico:

MODELO ANECDOTICO.

Existe un flujo de calor entre el medio ambiente del cuarto donde se encuentra un calentador con agua caliente apagado. La temperatura del agua indica la cantidad de calor almacenado. La transferencia de calor es proporcional a la diferencia entre la temperatura ambiente del cuarto y la temperatura del agua. La constante de proporcionalidad depende de las propiedades físicas del calentador de su volumen y de su material aislante.

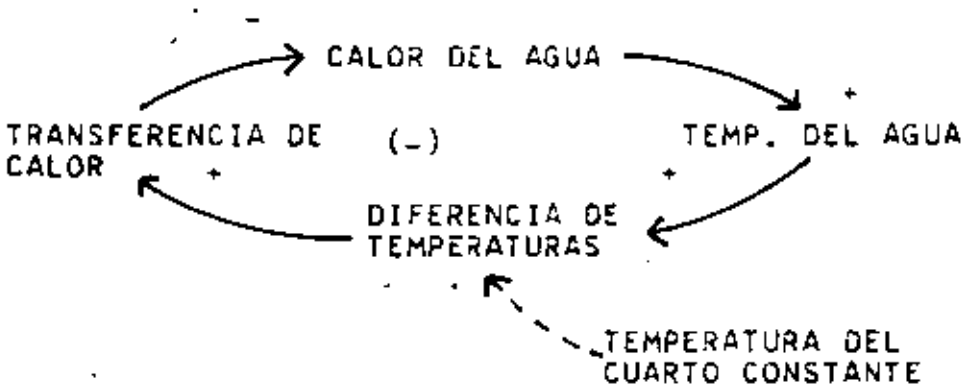
Elección de variables :

Calor del agua.....	CA	(calorias)
Tasa de transferencia de calor.....	TTC	(calorias/min)
Cte. de conversión calor-temp.....	C1	(Cº/caloria)
Cte. de transferencia de calor.....	C2	(cal./Cº/min)
Diferencia de temp. del agua y el cto.	TC	(Cº)
Temperatura del cuarto.....	TC	(Cº)
Temperatura del agua.....	T	(Cº)

Para obtener el diagrama causal se procede así:

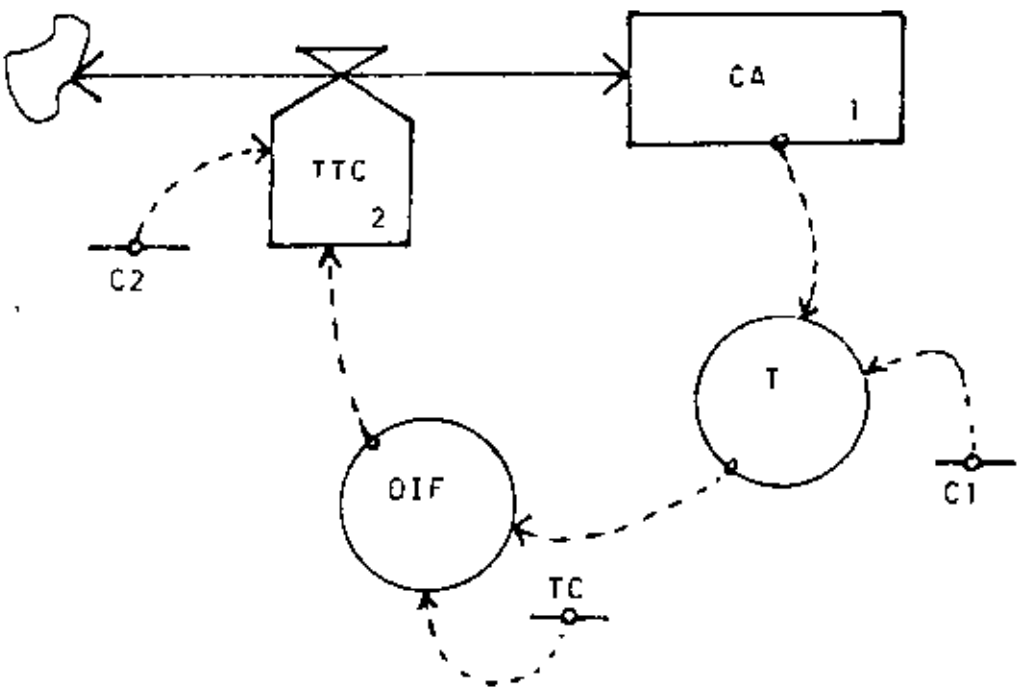
¿Al aumentar el calor del agua, qué le pasa a la temperatura del agua? Aumenta, luego el signo junto a TEMP. DEL AGUA es +. En caso de que para diferentes etapas del modelo las variables cambién de signo pondremos ± . Usando las reglas de los signos determinamos el signo del circuito, en este caso es (-).

DIAGRAMA CAUSAL:



Los circuitos negativos se caracterizan por tender a una meta o límite que puede ser fijo o variable. Los circuitos positivos se caracterizan por crecer sin límite (explosivamente) o decaer a cero.
En todos los casos se trata de circuitos de retroalimentación positiva o negativa los que toman el control del sistema según las circunstancias de la simulación.

A continuación dibujamos el
DIAGRAMA DYNAMO:



La tasa de flujo TTC es controlada por C" y por DIF que reciben información de T, TC y estos a su vez CA.

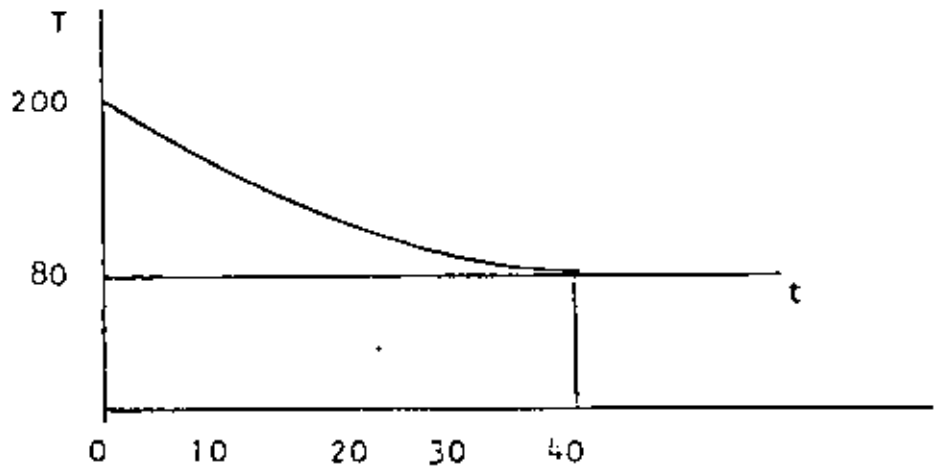
```
ECUACIONES DYNAMO.
CA.K=CA.J+(DT)(TTC.JK)                                          1
CA=T1/C1
T1=200
C1=1
CA        CALOR DEL AGUA
TTC       TASA DE TRANSFERENCIA DE CALOR
T1        TEMPERATURA INICIAL
C1        CONSTANTE DE CONVERSION DE CALOR A TEMP.
TTC.KL=(C2)(DIF.K)                                              2
C2=0.1
C2        CONSTANTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR
DIF       DIFERENCIA DE TEMP. ENTRE EL CUARTO Y EL AGUA
T.K=(C1)(CA.K)                                                  3
T         TEMPERATURA DEL AGUA
DIF.K=TC-T.K                                                    4
TC=78
TC        TEMPERATURA DEL CUARTO
```

Veamos como queda el programa para procesarlo en BATCH:

```
COLUMNA
1      7
?JOB AGUACALI ; USER=FA83/CL;CLASS=4;BEGIN
?EXECUTE *DYNAMO/DISK;
?EBCDIC DYNAMOINPUT
MANUAL/OCT80
DYNAMO NOZIP
RUN    AGUA FRIA
NOTE
       CA.K=CA.J+(DT)(TTC.JK)                                   1
       CA=T1/C1
       T1=200
       C1=1
NOTE
       TTC.KL=(C2)(DIF.K)  TASA DE TRANSF. DE CALOR             2
       C2=.1
NOTE
       T.K=(C1)(CA.K)  TEMP. DEL AGUA                           3
NOTE
       DIF.K=TC-T.K  DIFERENCIA DE TEMP.                        4
       TC=78
NOTE
NOTE   TARJETAS DE CONTROL DE IMPRESION Y GRAFICACION
NOTE
PRINT 1)T/2)TTC,CA/3)*/4)*/5)D
PLOT   T=T,TTC=H,DIF=C,CA=3
SPEC   DT=1/LENGTH=40/PRTPER=1,PLTPER=1
```

```
RUN    ENFRIAR2 CUARTO MAS CALIENTE
       TC=88
RUN    ENFRIA3  CUARTO MUCHO MAS FRIO
       TC=50
NOTE   LE HEMOS AÑADIDO AL MODELO ORIGINAL ESTAS DOS
NOTE   CORIDAS DONDE CAMBIAMOS LAS TEMPERATURAS DEL CUARTO.
?COMPILE EXPER ALGOL;
ALGOL PROCESS=200; IO=200;
?EBCDIC CARD
  $SET BCL MERGE FORMAT
TARJETA EN BLANCO
TARJETA EN BLANCO
?REMOVE MANUAL/OCT80
?END JOB
```

RESULTADOS DE LA SIMULACION.



TIEMPO	CA	T	DIF	TTC
0	200	200	-122	-12.2
1	187.8	187.8	-109.8	-10.98
2	176.82	176.82	-98.82	-9.88
3	166.94	166.94	-88.94	-8.89
.	.	.		
.	.	.		
.	.	.		
40	80	80		

NOTA:

Los resultados de la simulación se obtienen en el listado y contienen en primer lugar una lista de las variables con su referencia de tiempo y cada variable lleva una indicación sobre la potencia a la que hay que elevar el número que aparece abajo de la variable,esta indicación consiste en una letra E seguida del signo (+) o (-) y el número al que hay que elevar en potencias de diez,los números que aparecen en las columnas.

Después imprime las gráficas y vuelve a empezar con ENFRIAR2 hace otras listas y otras gráficas y sigue con ENFRIA3.

XII . ANALISIS DE SENSIBILIDAD

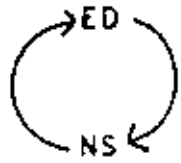
El análisis consiste en revisar para ver si existen algunos valores de las variables o de los parámetros que al variar un rango pequeño, hagan variar fuertemente el comportamiento del sistema. En algunos casos se busca evitar las oscilaciones del sistema haciéndolo estable mediante la reducción o aumento de los parámetros para lo cual el análisis de sensibilidad es inminente.

XIII. DESARROLLO DE OTROS EJEMPLOS

MODELO DINAMICO DE SIMULACION DEL DESARROLLO URBANO I

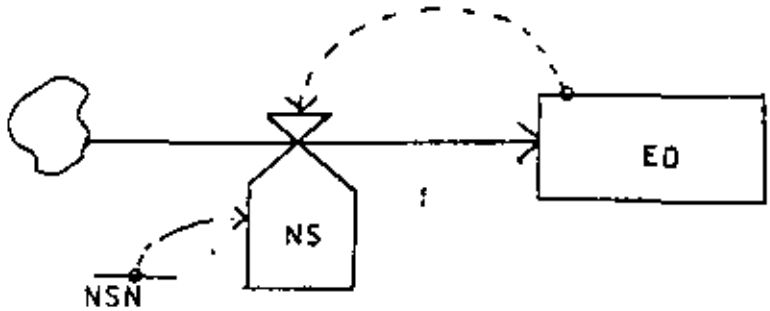
Este modelo ,se refiere al inicio de los estudios de los mecanismos existentes en el ámbito urbano. Nos referiremos al mecanismo que existe entre la construcción de edificios (NS) y los edificios ya construidos (ED).

Veamos el diagrama causal:



O sea que al aumentar el número de edificios también aumenta la construcción de los mismos.

El diagrama DYNAMO es :



ECUACIONES DYNAMO:

Los edificios actuales son iguales al número que había el año pasado más los que se construyeron durante el período de tiempo DT (un año).

ED.K=ED.J+(DT)(NS.JK)

Supondremos que ya existen ciertos edificios ED digamos que sean 1000 de valor inicial.

NS.KL=(ED.K)(NSN)

Se presenta a continuación una copia realizada en la terminal .

```
#B6700:126 CANDE 30.140; YOU ARE DLSPF11(24)
#INVALID USERCODE SYNTAX; ENTER USERCODE PLEASE.
FA83/BL
# DEFAULT PRINT DESTINATION=SITE
TECLEE NEWS PROXIMOS SEMINARIOS
#SESSION 1241  10:33:36  10/27/80
MAKE DYNAMOINPUT
#WORKFILE DYNAMOINPUT: SEQ
SEQ
100 REMOTE
200 DYNAMO DLIST NARROW CODE
300 RUN   EDNEG1
400 NOTE
500 NOTE  MECANISMOS DEL AMBITO URBANO,CONSTRUCCION DE EDIFICIOS=
600 NOTE  NS,EDIFICIOS CONSTRUIDOS=ED,TASA NORMAL DE CONST=NSN
700 NOTE
800       ED.K=ED.J+(DT)(NS.JK)
900       ED=EDI
1000       EDI=1000
1100       NS.KL=(ED.K)(NSN)
1200       NSN=.07
1300 PRINT 1)ED/2)NS
1400 PLOT  ED=E(0,8000)/NS=N(0,800)
1500 SPEC  DT=.5/LENGTH=30/PRTPER=2/PLTPER=1
#
SA
#WORKSOURCE DYNAMOINPUT SAVED; OLD SOURCE REMOVED
EXECUTE *DYNAMO/DISK
#RUNNING 1347
#?

ENTER IN COLUMNS 1-15 THE NAME OF THE DISK FILE YOU WISH
DYNAMO TO CREATE TO WRITE YOUR ALGOL SOURCE CODE.  IF OUTPUT
IS DESIRED ON THE LINE PRINTER ENTER C IN COLUMN 1 FOLLOWED
BY FILENAME


URB/180

OK

BURROUGHS B6700/B7700 DYNAMO LEVEL DYN454:10/20/80

INPUT PHASE BEGIN AT 10:43  4


DYNAMO DLIST NARROW CODE
RUN   EDNEG1

      MECANISMOS DEL AMBITO URBANO,CONSTRUCCION DE EDIFICIOS=
      NS,EDIFICIOS CONSTRUIDOS=ED,TASA NORMAL DE CONST=NSN

      ED.K=ED.J+(DT)(NS.JK)
      ED=EDI
      EDI=1000
      NS.KL=(ED.K)(NSN)
      NSN=.07
PRINT 1)ED/2)NS
PLOT  ED=E(0,8000)/NS=N(0,800)
SPEC  DT=.5/LENGTH=30/PRTPER=2/PLTPER=1
```

```
INPUT PHASE CONCLUDED AT  10:43 40


GENERATION PHASE BEGAN AT 10:43 43
$SET BCL RESET LIST
BEGIN   INTEGER W3000,W3001,W3002,W3003,W3004,W3005,W3006,W3007,W3009,W3
010,W3011,W3012,W3008;BOOLEAN W2500;ALPHA W3500,W3501,W3502,W3503,W3504,
W3505,W3506,W3507,W3508,W3509,W3510,W3511,W3521,W3522,W3523;     FILE W9
900(MYUSE=2,INTMODE=3,KIND=3,BUFFERS=2,MAXRECSIZE=9     );FORMAT W9910(/
X10,"STARTED TO RUN CODE AT ",5A6/),W9915(20A6),W9913(//X2,"FINISHED RUN
 NUMBER ",A6," AT ",5A6),W9921("PAGE ",I2,X4,A6/)        ,W9925(X20,5A6);
LABEL W6654;    FILE W9901(MYUSE=2, INTMODE=3, KIND=1, BUFFERS=2, AREAS=
20, AREASIZE=1000, TITLE=       8"WDYNAMO/BINARY.",          SAVEFACTOR=1,
MAXRECSIZE=         4);DEFINE DBL=SPACE 1#;REAL LENGTH,F1,NSN,PERPER,D1,N
SMAXO,NSMINO,ED,EDMAXO,EDMINO,PRTPER,ED1,        TIMEX,W3901,W3900; REAL
 ARRAY  NS[0:13,W3499[0:43];     DEFINE W1111TIME=TIMEX#; LIST W9959(FOR
W3005:=0       STEP 1UNTIL 4DO W3499[W3005]);   PROCEDURE W2978(T);VALUE
 T;REAL T;BEGIN INTEGER A,B,C,D;PROCEDURE CLOCK(W,B,C,D);VALUE W;INTEGER
 B,C,D;POINTER W;BEGIN POINTER D1,S1;ARRAY LOCALL0:0];REPLACE D1:POINTER
(LOCAL[0])BY B FOR 2DIGITS,             C FOR 2DIGITS,                  D
FOR 4DIGITS;IF S1:=        POINTER(LOCAL[0])="0"THEN BEGIN REPLACE D1:
W+2BY" ";S1:=        S1+1;END ELSE REPLACE D1:   W+2BY S1:S1 FOR 1;REPLAC
E D1:D1 BY S1:S1 FOR 1,                    ":",                    S1:S1 FOR 2
,          .          ".";REPLACE        D1+2BY    S1 FOR 4,      ", "END CLOCK
;A:=        ENTIER(T);B:=        A DIV 60;C:=A MOD 60;D:=(T-        A)*10000
;CLOCK(POINTER(W3499[0]),B,C,D)END W2978;PROCEDURE W2979(T);VALUE T;ALPH
A T;BEGIN LABEL X;INTEGER L,M,N,P;ALPHA ARRAY A,BL0:0];PROCEDURE LINE(PL
ACE,DAY,L,MONTH,M,YEAR,N);VALUE PLACE,DAY,L,MONTH,M,YEAR,N;INTEGER L,M,N
;POINTER YEAR,MONTH,DAY,PLACE;BEGIN POINTER S1;REPLACE PLACE BY DAY[(D-L
) FOR L, S1:MONTH+1 FOR 7,                          S1:1 FOR M,YEAR+6 FOR 2,
" "     FOR N  , END;                                          PROCEDURE LIFT(
A);VALUE A;POINTER A;BEGIN POINTER S1,D1;ARRAY LOCALL0:2];S1:=        A;D
1:=     POINTER(LOCAL[0]);THRU 3DO BEGIN REPLACE D1:   D1+2BY S1:S1 FO
R 6END;REPLACE        A BY        POINTER(LOCAL[0]);FOR 3WORDS END LIFT;ALP
HA       ARRAY MN[0:11,0:13,DAYS[0:12];FILL DAYS[*]WITH"000","031","059",
"090","120","150","181","212","243","273","304","334","365";FILL MN[0,*]
WITH" JANUAR","Y 19  4";FILL MN[1,*]WITH" FEBRUA","RY 19 5";FILL MN[2,*]
WITH" MARCH ","19    2";FILL MN[3,*]WITH" APRIL ","19    2";FILL MN[4,*]
WITH"  MAY 1","9     1";FILL MN[5,*]WITH" JUNE 1","9     1";FILL MN[6,*]
WITH" JULY 1","9     1";FILL MN[7,*]WITH" AUGUST","  19   3";FILL MN[8,*]
WITH" SEPTEM","BER 196";FILL MN[9,*]WITH" OCTOBE","R 19  4";FILL MN[10,*
]WITH" NOVEMB","ER 19 5";FILL MN[11,*]WITH" DECEMB","ER 19 5";BL0]:=
   T.[29:12];AL0]:=        T.[17:18];IF INTEGER(POINTER(BL0]),2)MOD 4=0AN
D INTEGER(POINTER(AL0]),3)>31THEN FOR N :=        2STEP 1UNTIL 12DO DAYS[N
]:=        DAYS[N]+1;FOR N:=        1STEP 1UNTIL 12DO IF AL0] LEQ      DAYS
[N]THEN GO TO X;X:REPLACE POINTER(AL0],6) BY (INTEGER(POINTER(AL0],6)+5,
3) - INTEGER(POINTER(DAYS[N-1],6)+5,3))  FOR 6 DIGITS; IF  INTEGER(POINTE
R(AL0],6)+5,3)>9 THEN L :=2 ELSE L:=1; M:=MN[N-1,1],L3:4];P:=15-M-L;LINE
(POINTER(W3499[2]),POINTER(AL0]),L,POINTER(MN[N-1,0]),M,POINTER(BL0]),P)
;LIFT(POINTER(W3499[2]))END W2978;            REAL PROCEDURE LOG(A);VALUE
A;REAL A;IF A>0THEN LOG :=        LN(A)/2.302585093 0ELSE LOG:=0;  REAL PRO
CEDURE CLIP(G,L,N,C);REAL G,L,N,C;BEGIN IF N<0 THEN CLIP:=L ELSE CLIP:=
G       END;      PROCEDURE BOXCYC(N,T,B);VALUE N,T;INTEGER N,T;ARRAY BL0]
;BEGIN   IF BL0]=0THEN BL0]:=1  ;IF TIMEX GEQ      BL0]+B1/2THEN BEGIN RE
AL S;S:=        BL[N];DO BL[N]:=        BLN 1UNTIL(N:=N-1) LEQ     1;BL1]:=S
;BL0]:=       BL0]+T END;END;     PROCEDURE BOXLIN(N,T,B);VALUE N,T;INTEGE
R N,T;ARRAY BL0];BEGIN   IF BL0]=0THEN BL0]:=T  ;IF  TIMEX GEQ      BL0]+B
T/2THEN BEGIN DO BL[N]:=        BLN-1UNTIL(N:=N-1) LEQ 1;BL1]:=  0;BL0]:=
BL0]+T END;      END;     PROCEDURE BOXLOA (P,Q,T,N);VALUE P,Q,N;ARRAY TL0
```

```
];REAL P,Q;INTEGER N;BEGIN DO TEN]:=P*Q UNTIL(  N:=     N-1)<1;T[0]:=0END
;       BOOLEAN W99NOISE,W99NOIS9;REAL PROCEDURE NOISE ;NOISE :=REAL((W9
9NOISE:=       BOOLEAN(2045*REAL(W99NOISE)+21152/139)AND BOOLEAN (2**27-1
)) OR W99NOIS9)-0.5;     REAL PROCEDURE NORMRN(M,S);VALUE M,S;REAL M,S;BE
GIN INTEGER I;REAL R;R:=0;FOR I :=1      STEP 1UNTIL 12 DO R := R+NOISE;
NORMRN := R*S+M END NORMRM;              REAL PROCEDURE PULSE(P,Q,R,T);VA
LUE P,Q,R;REAL P,Q,R,T;BEGIN IF TIMEX    NEQ 0  THEN IF TIMEX GEQ     T-Q
T/2THEN BEGIN PULSE:=P; T:=T+R       END ELSE PULSE:=0 ELSE IF T :=Q NEQ
0 THEN PULSE:=0 ELSE PULSE:=P END;       REAL PROCEDURE SAMPLE(P,Q,T,V);V
ALUE P,Q;REAL P,Q,T,V;BEGIN IF TIMEX NEQ 0     THEN BEGIN IF TIMEX GEQ T-
DT/2     THEN BEGIN V:=P;T:=T+Q        END END ELSE T:=Q;SAMPLE:=V END;
REAL PROCEDURE W99STEP(P,Q,V);VALUE P,Q,V;REAL P,Q,V;IF TIMEX     GEQ  Q-
DT/2THEN W99STEP:=P ELSE W99STEP:=V;     REAL PROCEDURE RAMP(P,Q,V);VALUE
 P,Q,V;REAL P,Q,V;IF TIMEX GEQ Q+DT/2THEN RAMP:=      P+V ELSE RAMP:=V;
REAL PROCEDURE SWITC(G,L,N);REAL G,L,N;BEGIN IF N=0THEN SWITC:=G ELSE SW
ITC:=L   END    ;        REAL PROCEDURE TABHL(N,F,F,L,R);REAL F,F,L,R;REA
L ARRAY N[*];BEGIN INTEGER I,J;REAL Q;IF F GEQ F THEN TABHL:=N[1]ELSE IF
(I:=  ENTIER(Q:=(P-F)/R+1)) GEQ (J:=  ENTIER((L-F)/R+1))THEN TABHL:=N[J]
ELSE         TABHL:=(Q-I) TIMES  (N[I+1]-N[I])+N[I]END;  REAL PROCEDURE S
UM1(N,P);VALUE N  ;INTEGER N;ARRAY P[*];BEGIN INTEGER I;REAL R;DO R:=R+P
[I:=I+1] UNTIL I GEQ   N;SUM1:=R END;   REAL PROCEDURE SUM2(N,P,Q);VALUE
 N    ;INTEGER N;ARRAY P[*],Q[*];BEGIN INTEGER I;REAL R;DO R:=R+P[I:=I+
1]*     Q[I] UNTIL I GEQ     N;SUM2:=R          END;REAL PROCEDURE SUM3(N,
P,Q,R);VALUE N       ;INTEGER N;ARRAY P[*],Q[*],R[*];BEGIN INTEGER I;REAL
 S;DO S :=       S+P[I:=I+       1]*Q[I]*R[I] UNTIL I GEQ      N;SUM3:=S
END;    REAL PROCEDURE RAMP1(P,Q,V);VALUE P,Q,V;REAL P,Q,V;IF TIMEX GEQ
Q+DT/2 THEN RAMP1:=  (TIMEX-Q)*P+V ELSE RAMP1:=V;        W3004:=1;W2979(
TIME(0))       ;WRITE(W9900[SKIP 1]); W3500:=     "LDNEG1";        WRITE(W9
900    ,W9921,W3004,W3500);W3004:=W3004+1        ;W2978(TIME(1)/3600);WRI
TE(W9900,W9925,W9959);
                                FOR W3003:=1STEP 1UNTIL  100     BEGIN LABEL W401
2;LIST W9940(TIMEX,      NS[W3000],ED);  BEGIN LABEL W4405,W4005;
W3006:=W3900:=TIMEX:=0;W3001:=1;PI:=    3.14159265358979; W99NOISE:=BOOLEA
N        (0&6"98"[46:10:11]);     PRTPER:=2;PLTPER:=1;DT:=.5;        W3701:=
IF PLTPER GTR    PRTPER AND PRTPER NEQ 0 OR     PLTPER=0 THEN PRTPER ELSE
 PLTPER;BEGIN LABEL W4444;
                                                FORMAT OUT W9742(X4,A6,2(X4,R11.4)
);LABEL
        W6001,W6002;     SWITCH W6000:=  W6001;  GO TO W6000[W3001];

W6001:PLTPER:=1;PRTPER:=2;LENGTH:=30;DT:=.5;NSN:=.07;ED1:=1000;ED:=ED1+N
S[0]:=(ED)*(NSN);GO TO W6002;W6002:
                                        NSMAX0:=NSMIN0:=NS[0];EDMAX0:=EDMIN0:
=ED;     W4444:END;W2998(TIME(1)/3600);WRITE(W9900,W9910,W9959);FOR TIMEX
:=0 STEP DT UNTIL 1 +   LENGTH DO BEGIN IF TIMEX<DT THEN GO W4005;IF BOO
LEAN(W3001)THEN BEGIN W3001:=0;W3000:=1        END ELSE BEGIN W3001:=1;W3
000:=0  END;     ED:=ED+(DT)*(NS[W3001]);

                                                NS[W3000]:=(ED)*(NSN);
                                                                W4405:W400
5:       IF TIMEX GEQ W3900-DT/2      OR TIMEX<DT THEN BEGIN LABEL W4444;W
3900:=W3900+        W3901;      WRITE (W9901,*,W9940);  IF NS   [W3000]>
NSMAX0 THEN NSMAX0:=NS  [W3000] ELSE IF NS      [W3000]<NSMIN0 THEN NSMI
N0:=NS  [W3000];IF ED>EDMAX0 THEN EDMAX0:=ED ELSE IF ED<EDMIN0 THEN EDMI
RUN  PHASE  GENERATED AT  10:40 10
N0:=ED;W4444:   END END;REWIND(W9901);W3000:=        W3001:=0END;
                                                                BEGIN IN
TEGER LFR;       FORMAT OUT W9911(X10,"SIARTED PRINTING AT ",5A6/),W9916(
```

```
X1,F7.*,X1,F7.*,X1,F7.*,/)        ,W9923(" TIME        ED        NS "/)
,W9922( X3,A4,X4,A4,X4,A4/)};     INTEGER ARRAY A1[0:          2     ];ARRAY
A2[0:       2     ];ALPHA ARRAY SC[0:          2];LIST W9941(        FOR W300
8:=0STEP 1UNTIL     2     DO[A1[W3008],A2[W3008]] );          LABEL W4000,W4
001,W4002;       PROCEDURE W0099(IMAX,SCALE,ORDINAL,EXPONENT,DECIMALPLACE
S);VALUE IMAX;REAL IMAX,SCALE;INTEGER ORDINAL;ALPHA ARRAY EXPONENT[0];IN
TEGER ARRAY DECIMALPLACES[0];BEGIN INTEGER I1,I2;ARRAY LOCAL[0:1];IF I1
:=ENTIER(LOG(IMAX)) EQ 0 THEN I2:=0 ELSE I2:=1      ;LOCAL[0]:=SCALE:=3
*((I1:=      I1-2+I2)DIV 3);DECIMALPLACES[ORDINAL-1]:=     ABS(I1 MOD 3-2-
I2);REPLACE POINTER(LOCAL[1])+6 BY LOCAL[0]FOR 2DIGITS;EXPONENT[ORDINAL-
1]:=0:  "E"       [23:5:6]:(IF SCALE<0THEN"-"ELSE"+")[17:5:6]:LOCAL[1][11
:11:12];SCALE:=10**SCALE END W0099;      REAL W7001,W7002,W7003,W7004;
      IF PRTPER=0THEN GO TO W4002;W3509 :=       "       ";W3510:="- - - "
;       W0099(LENGTH,W7001,  1,SC,A1);W0099(MAX(ABS(EDMAX0),ABS(EDMIN0))
,W7002,  2,SC,A1);W0099(MAX(ABS(NSMAX0),ABS(NSMIN0)),W7003,  3,SC,A1);
      W2500:=       TRUE;W4000:W3007:= 0;WRITE(W9900  [SKIP 1  ]);WRITE
(W9900    ,W9921,W3004,W3500);W3004:=       W3004+1;IF W2500 THEN BEGIN
W2998(TIME(1)/3600);WRITE(W9900,W9911,W9959)END ELSE WRITE(W9900[DBL],W9
915);WRITE(W9900,W9923          );IF W2500 THEN BEGIN W2500:=       FALS
E;W3007 :=       2       ;WRITE(W9900,W9922,FOR W3008:=0 STEP 1 UNTIL
   2    DO SC[W3008]    );END;W4001:    FOR W3007:=       W3007 STEP  2W
HILE W3007+ 4 LEQ 52    DO BEGIN LABEL W4003,W4004;READ(W9901,*,W9940)[W
4003];IF LENGTH/W3901-(LFR:=LFR+1)LEQ-2 THEN GO W4003;A2[   0]:=W1111;IM
E/W7001;A2[   1]:=ED/W7002;A2[   2]:=NS[0]/W7003;       WRITE(W9900,W971
6,W9941);       IF PRTPER> W3901 THEN SPACE(W9901,ENTIER((PRTPER- W3901)
/ W3901))[W4003];GO TO W4004;W4003:REWIND(W9901);GO TO W4002;W4004:END;G
PRINT PHASE GENERATED AT  10:49 38
O TO W4000;W4002:END;
                    BEGIN   ALPHA ARRAY W3501[0:100],W3502[0:140],W3
520[-11:12];  FORMAT OUT W9912(X10,"BEGAN PLOTTING A: ",5A6/),W9919(10.1
,A1,X8,F8.1,A1,X11,F8.1,A1,X9,F8.1,A1,X1,A6,A1),W9914(A3, 61A1,X1, 8A1);
REAL  W0038, W0039,W0040,W0041,W0042,W0043,W0044,W0045; ALPHA PROCEDURE
W3596(W);ALPHA W;BEGIN POINTER P1,P2;ARRAY LOCAL[0:0];LOCAL[0]:=       W
;SCAN P2:P1:=       POINTER(LOCAL[0])+2FOR 6 WHILE=      "0"; W3596:=W: "
     " [35:35:6*DELTA(P1,P2)]END W3596;ALPHA PROCEDURE W3597(W);INTEGER
W;BEGIN             ARRAY LOCAL[0:0];REPLACE POINTER(LOCAL[0]):2BY W FOR
6DIGITS;W3599:=       LOCAL[0]END W3597;    PROCEDURE W3570(W3000,W3502,
W3506,W3504);VALUE W3000;INTEGER W3000;ALPHA W3504,W3506;ALPHA ARRAY W35
02[0];BEGIN INTEGER W3001,W3002;LABEL W4000;W3002:=0;FOR W3001:=       W3
000 STEP-2UNTIL 2DO BEGIN IF W3502[W3002]=" "THEN BEGIN W3502[W3002]:=
     W3506;W3502[W3002+1]:=       W3504;GO TO W4000 END ELSE IF W3502[W3
002]=W3506 THEN FOR W3000:=2STEP 1 UNTIL       W3001 DO IF W3502[W3002+
W3000]=" "THEN BEGIN W3502[W3002+W3000] :=       W3504;GO TO W4000 END;W3
002:=W3002+W3001 END   SEARCH;W4000:END OF W3570;PROCEDURE W3597(W3502,W
3012);VALUE W3012;INTEGER W3012;ALPHA ARRAY W3502[0];BEGIN INTEGER W3000
,W3001,W3002;BOOLEAN W2500;LABEL W4000,W4001,W4002;W3000:=W3002 :=0;FOR
W3012:=    W3012 STEP-2UNTIL 2DO BEGIN W2500:=TRUE;FOR W3001:=0    STEP
1 UNTIL  W3012-1DO IF W3502[W3000+W3001]=" "THEN IF  W2500 THEN GO TO W40
01 ELSE GO TO W4000 ELSE BEGIN W2500:=       FALSE;W3502[W3002] :=W3502[
W3000+W3001];W3002:=     W3002+1END;W3002:=W3002:1;GO TO W4001;  W4000:
W3502[W3002]:=  ","     ;W3002:=W3002+1;W3000:=       W3000+W3012 END;W40
01:FOR W3002:=IF W3002   NEQ 0 THEN W3002 1ELSE 0STEP 1UNTIL 14DO W3502[
W3002]:=" ";W4002:END;    FILL W3520[*]WITH"R","Y","W","U","L","J","H","
G","F","E","A","X","T","M","B","K","Q","V","S","P","C","N","D","Z"; IF P
LTPER=0THEN GO TO W4012;BEGIN LABEL W4009;INTEGER LFR;  FORMAT W9923 ("
     ED=E, NS=N          "/);LIST W9942 (ED,NS[0]);ARRAY W1010,W1000,W102
```

```
0[0: 2];ALPHA ARRAY W3504[1: 3];FILL W3504[*]WITH "E","N";                W
RITE(W9900[SKIP 1]);WRITE(W9900  ,W9921,W3004,W3500);W3004:=        W3004
+1;W2998(TIME(1)/3600);WRITE(W9900,W9912,W2959);WRITE(W9900,W9923);
BEGIN LABEL L;W1000[ 1]:=        0                          ;W1020[ 1]:=
8000                    ;BEGIN W0038:=W1000[ 1];W0039:=W1020[ 1];END;W100
0[ 1]:=W0038;W1020[ 1]:=W0039;  IF ABS(W3007):=  LOG      (ABS(W0039))) GE
Q     4THEN BEGIN W0039 :=W0039/10**(       W3007:=3*ENTIER        (LOG(WO
039)/3));W0038:=W0038/10**W3007;W3521:=        W3520[W3007/3];END ELSE W35
21:=" ";        W3522:="E      ";W3523:="       "  ;WRITE(W9900,W9919,W0038
,W3521,W0041:=(W0040:=       (W0039-W0038)/3);W0038,W3521
                  ,W0043:=        W0039-W0040,W3521,W0039,W3521,W3522,W35
23);    L:END;BEGIN LABEL L;W1000[ 2]:= 0                          ;W1020[
2]:=    800                     ;BEGIN W0038:=W1000[ 2];W0039:=W1020[ 2]
END;W1000[ 2]:=W0038;W1020[ 2]:=W0039;  IF ABS(W3007):=  LOG      (ABS(W00
39))) GEQ     4THEN BEGIN W0039 :=W0039/10**(       W3007:=3*ENTIER
 (LOG(W0039)/3));W0038:=W0038/10**W3007;W3521:=        W3520[W3007/3];END
ELSE W3521:=" ";        W3522:="N      ";W3523:="       "  ;WRITE(W9900,W99
19,W0038,W3521,W0041:=(W0040:=       (W0039-W0038)/3);W0038,W3521
                          ,W0043:=        W0039-W0040,W3521,W0039,W3521,W
3522,W3523);    L:END;  W3010:=10;DO BEGIN    READ(W9901,*,W9940)[W4009]
;       FOR W3008:=0STEP 10UNTIL 100DO W3501[W3008]:=      " ";FOR  W3008:=
0,20,40,60    DO W3501[W3008]:=".";W3505:="     ";IF W3010=10;THEN BEGIN W
3010:=0;      W3008:=        ENTIER((IMEX1.5);W3523:=W3597(W3008);W3505:=
     W3596(W3523);W3501[0]:=" ";FOR W3008:=2       STEP 2UNTIL 100DO W350
1[W3008]:=        "-"END;W3010:=W3010+1; FOR      W3008:= 0STEP 1UNTIL 140
DO W3502[W3008] :=       " ";     W1010[ 1]:=LD;W1010[ 2]:=NSLOT; FOR W300
8:=1STEP 1UNTIL  2       DO BEGIN LABEL W4011;W3009:=(        W1010[W3008]
-W1000[W3008])/(W1020[W3008]-W1000[W3008])* 60;        IF W3009< .5OR W30
09> 60.5THEN GO TO W4011;W3506:=W3501        [W3009];IF W3506=" "OR W3506
=".";OR W3506="-"THEN W3501[W3009]:=W3504[W3008]ELSE W3597(        3
 ,W3502,W3506,W3504[W3008]);W4011:END;W3597(W3502,        3         );WRIT
E(W9900,W9914,W3505,FOR W3008:=0  STEP 1      UNTIL  60DO W3501[W3008];FO
R W3009 :=0 STEP 1      UNTIL  6DO W3502[W3009];IF PLTPER> W3901 THEN SP
ACE(W9901,ENTIER((PLTPER-W3901) / W3901))[W4009] ELSE     END UNTIL
PLOT PHASES GENERATED AT  10:52 26
LENGTH/W3901-(LFR:=LFR+1)LEQ-1  ;W4009:REWIND(W9901);END;END;W4012:
W2998(TIME(1)/3600);WRITE(W9900,W9913,W3500,FOR W3005:=0STEP 1        UNT
IL 4DO W3499[W3005]);   END;END.


ELAPSED COMPILATION TIME     10  2


PLEASE ENTER COMPILE URB/180          WITH ALGOL.  THEN
WAIT UNTIL YOUR TERMINAL REPORTS THAT YOUR COMPILATION
IS COMPLETE.  AFTER GOOD COMPILATION ENTER  EXECUTE
URB/180

 COMPILE URB/180 WITH ALGOL
 *COMPILING 1496
 $SET BCL RESET LIST
 00001000 WARNING-BCL PROGRAMS ARE NOT PORTABLE TO EDCDIC MACHINES.
 *ET=26.9 PT=10.0 IO=7.0
```

EXECUTE URB/180
*RUNNING 1502

PAGE 1 EDNEG1

11:01.6103, 28 OCTOBER 1980

STARTED TO RUN CODE AT 11:01.6203, 28 OCTOBER 1980

PAGE 2 EDNEG1

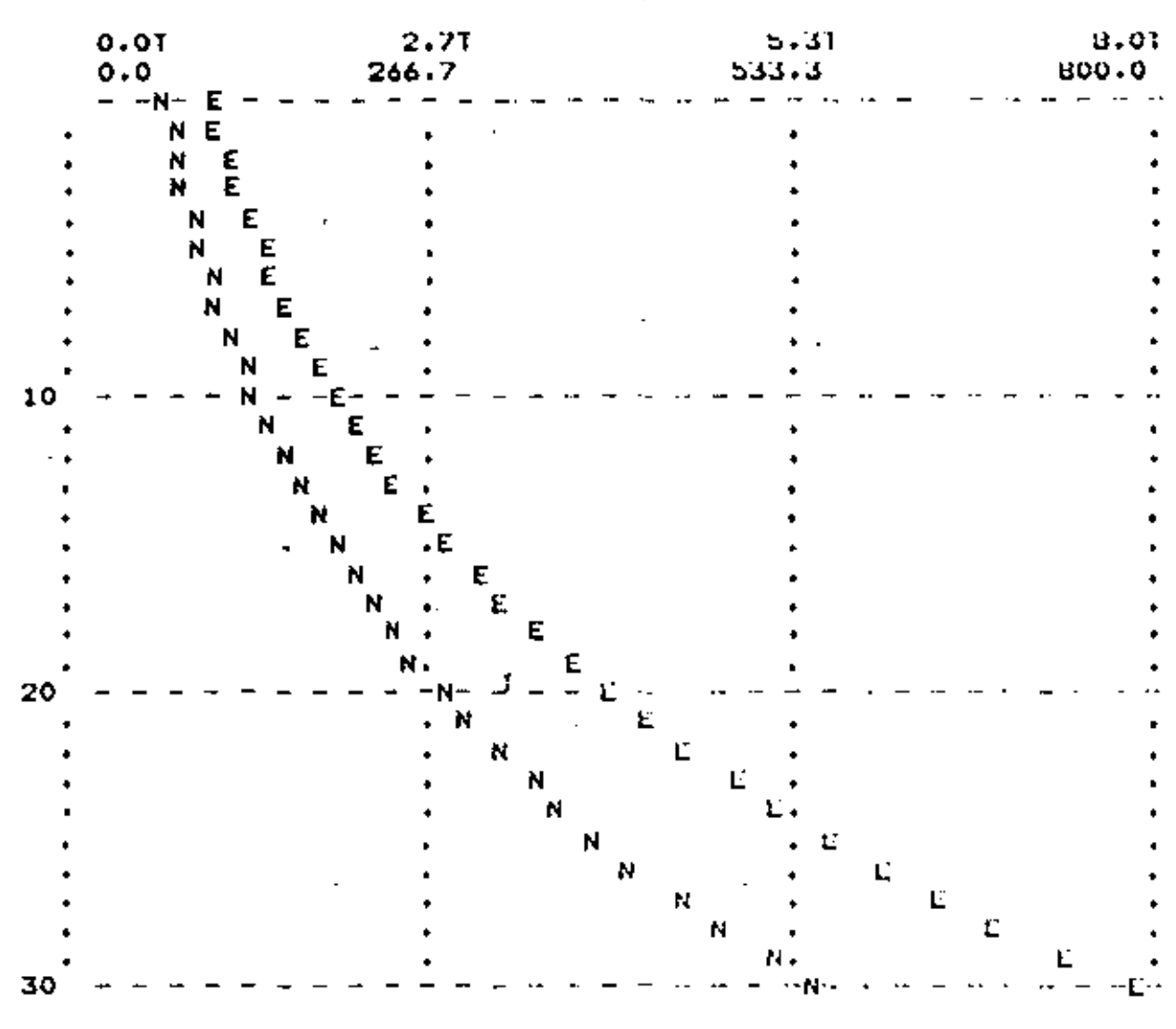
STARTED PRINTING AT 11:01.7050, 28 OCTOBER 1980

TIME	ED	NS
E+00	E+00	E+00
0.000	1000.0	70.00
2.000	1147.5	80.33
4.000	1316.8	92.18
6.000	1511.1	105.77
8.000	1734.0	121.38
10.000	1989.8	139.29
12.000	2283.3	159.83
14.000	2620.2	183.41
16.000	3006.7	210.47
18.000	3450.3	241.52
20.000	3959.3	277.15
22.000	4543.3	318.03
24.000	5213.6	364.95
26.000	5982.7	418.79
28.000	6865.3	480.57
30.000	7878.1	551.47

PAGE 3 EDNEG1

BEGAN PLOTTING AT 11:02.1894, 28 OCTOBER 1980

ED=E, NS=N

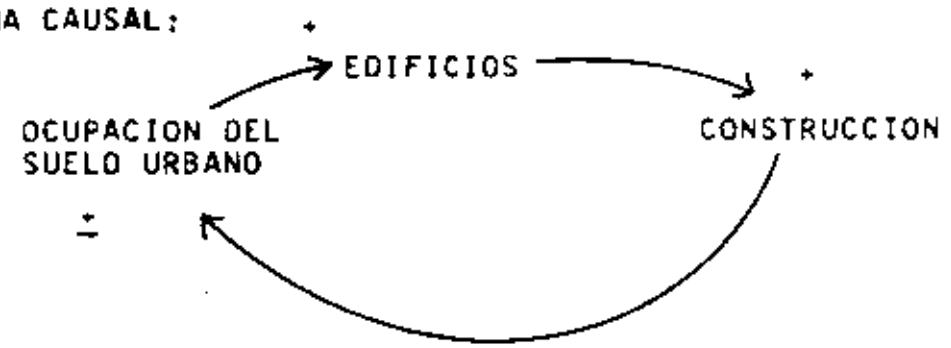


FINISHED RUN NUMBER EDNEG1 AT 11:03.5677, 28 OCTOBER 1980
*ET=2:06.9 PT=2.2 IO=2.1
EXECUTE URB/180; FILE W9900(PRINTER)
*RUNNING 1532
*ET=19.1 PT=2.5 IO=2.6
WRITE DYNAMOINPUT

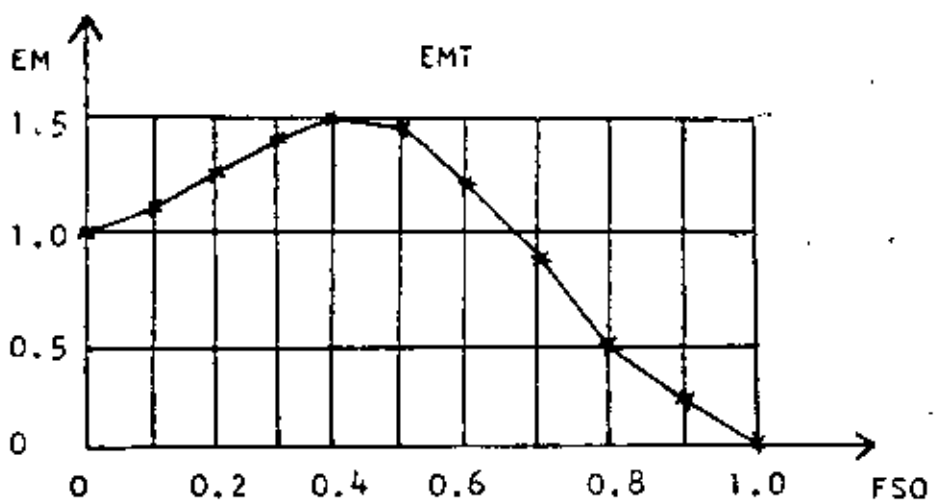
MODELO DINAMICO DE SIMULACION DEL DESARROLLO URBANO II

Complicaremos el modelo anterior añadiéndole lo siguiente: La tasa de construcción NS se verá afectada por un efecto multiplicador que tome en cuenta que mientras más construcciones haya al inicio del desarrollo habrá más alicientes para que se construya más, pues se establecen servicios que pueden ser aprovechados. Se abren restoranes cerca de los edificios, se instala energía eléctrica, gas, agua potable, telefonos, etc. Este efecto dura hasta que la densidad de edificios aumenta, o sea, cuando aumenta la ocupación del suelo el fenómeno se invierte y el efecto tiende a disminuir la tasa de construcción.

DIAGRAMA CAUSAL:



Para poder introducir el efecto multiplicador, tendremos que relacionarlo con la densidad, y la haremos mediante una tabla:



Cuya ecuación es:

EM.K=TABLE(EMT,FSO.K,0,1,.1)

EMT*=1/1.15/1.3/1.4/1.45/1.4/1.3/.9/.5/.25/0

O sea que entrando con un valor FSO , refiriéndolo a la gráfica y luego al eje EM nos dará el valor del multiplicador según sea la forma de la curva experimental. Esta cualidad permite introducir a la computadora elementos subjetivos como corazonadas dándole diversas formas a las curvas según nuestra intuición y luego revisando y verificando o cambiando los resultados.

Veamos como se forma la ecuación FSO:

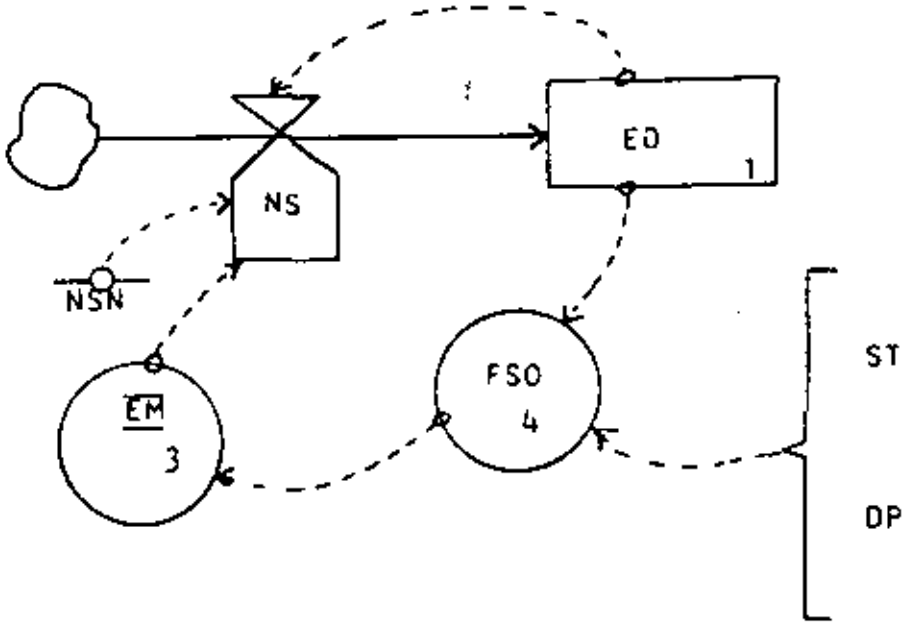
FSO va a ser la fracción de suelo ocupado por los edificios por lo que intervendrá en su ecuación, los edificios ED, la superficie total del ámbito urbano o sistema considerado, y la densidad media dada en hectáreas por edificio:

FSO.K=(ED.K)(DP)/ST

ST=1000

DP=0.2

Veamos como se modificó nuestro diagrama DYNAMO:



Las ecuaciones DYNAMO quedan:

```
ED.K=ED.J+(DT)(NS.JK)
ED=1000

ED     edificios            (unidades)
NS     tasa de construcción   (unids/año)

NS.KL=(ED.K)(NSN)(EM.K)
NSN=0.7

NS     tasa de construcción   (unids/año)
ED     edificios              (unidades)
NSN    valor normal de la tasa NS  (fracción/año)

EM.K=TABLE(EMT,FSO.K,0,1,.1)
EMT*=1/1.15/1.3/1.4/1.45/1.4/1.3/.9/.5/.25/0

EM      efecto multiplicador  (adimensional)
EMT     nombre de la tabla
FSO     fracción de suelo ocupado  (fracción)

FSO.K=(ED.K)(DP)/ST
ST=1000
DP=.2

ST      superficie total en estudio (Hectáreas)
DP      densidad promedi (Ha/unid.)
```

```
100 REMOTE
200 DYNAMO DLIST NARROW
300 RUN   EDNEG2
400 NOTE
500 NOTE  MECANISMOS DEL AMBITO URBANO,CONSTRUCCION DE EDIFICIOS=
600 NOTE  NS,EDIFICIOS CONSTRUIDOS=ED,TASA NORMAL DE CONST=NSN
700 NOTE   AL MODELO ANTERIOR SE LE AGREGA EL EFECTO MULTIPLICADOR
800 NOTE  POR LA FRACCION DE SUELO OCUPADO POR LOS EDIFICIOS(FSO)
900 NOTE  TOMANDOSE EN CUENTA LA SUPERFICIE TOTAL(ST) Y LA DENSIDAD
1000 NOTE  PROMEDIO DE SUELO OCUPADO POR EDIFICIO (DP)
1100 NOTE
1200        ED.K=ED.J+(DT)(NS.JK)
1300        ED=EDI
1400        EDI=1000
1500        NS.KL=(ED.K)(NSN)(EM.K)
1600        NSN=.07
1700        EM.K=TABLE(EMT,FSO.K,0,1,.1)
1800        EMT*=1/1.15/1.3/1.4/1.45/1.4/1.3/.9/.5/.25/0
1900 NOTE
2000        FSO.K=(ED.K)(DP)/ST
2100        ST=1000 HECTAREAS
2200        DP=.2 HECTAREAS POR EDIFICI
2300 PRINT 1)ED/2)NS/3)FSO
2400 PLOT  ED=E/NS=N/FSO=F
2500 SPEC  DT=.5/LENGTH=30/PRTPER=2/PLTPER=1
#
800NOTE  (EM) POR LA FRACCION DESUELO DEL
800NOTE  (EM) POR LA FRACCION DE SUELO OCUPADO POR LOS EDIFICIOS(FSO)
RES
#UPDATING
#
L 800
800 NOTE  (EM) POR LA FRACCION DE SUELO OCUPADO POR LOS EDIFICIOS(FSO)
#
2200       DP=.2 HECTAREAS POR EDIFICIO
RES
#UPDATING
#
L
100 REMOTE
200 DYNAMO DLIST NARROW
300 RUN   EDNEG2
400 NOTE
500 NOTE  MECANISMOS DEL AMBITO URBANO,CONSTRUCCION DE EDIFICIOS=
600 NOTE  NS,EDIFICIOS CONSTRUIDOS=ED,TASA NORMAL DE CONST=NSN
700 NOTE   AL MODELO ANTERIOR SE LE AGREGA EL EFECTO MULTIPLICADOR
800 NOTE  (EM) POR LA FRACCION DE SUELO OCUPADO POR LOS EDIFICIOS(FSO)
900 NOTE  TOMANDOSE EN CUENTA LA SUPERFICIE TOTAL(ST) Y LA DENSIDAD
1000 NOTE  PROMEDIO DE SUELO OCUPADO POR EDIFICIO (DP)
1100 NOTE
1200        ED.K=ED.J+(DT)(NS.JK)
1300        ED=EDI
1400        EDI=1000
1500        NS.KL=(ED.K)(NSN)(EM.K)
1600        NSN=.07
1700        EM.K=TABLE(EMT,FSO.K,0,1,.1)
1800        EMT*=1/1.15/1.3/1.4/1.45/1.4/1.3/.9/.5/.25/0
```

```
1900 NOTE
2000        FSO.K=(ED.K)(DP)/ST
2100        ST=1000 HECTAREAS
2200        DP=.2 HECTAREAS POR EDIFICIO
2300 PRINT 1)ED/2)NS/3)FSO
2400 PLOT  ED=E/NS=N/FSO=F
2500 SPEC  DT=.5/LENGTH=30/PRTPER=2/PLTPER=1
*
SA
*WORKSOURCE DYNAMOINPUT SAVED; OLD SOURCE REMOVED
EXECUTE *DYNAMO/DISK
*RUNNING 1881
*T

ENTER IN COLUMNS 1-15 THE NAME OF THE DISK FILE YOU WISH
DYNAMO TO CREATE TO WRITE YOUR ALGOL SOURCE CODE.  IF OUTPUT
IS DESIRED ON THE LINE PRINTER ENTER C IN COLUMN 1 FOLLOWED
BY FILENAME


URB/280

OK

BURROUGHS B6700/B7700 DYNAMO LEVEL DYN454:10/20/80

INPUT PHASE BEGIN AT 11:39 55


DYNAMO DLIST NARROW
RUN   EDNEG2

      MECANISMOS DEL AMBITO URBANO,CONSTRUCCION DE EDIFICIOS=
      NS,EDIFICIOS CONSTRUIDOS=ED,TASA NORMAL DE CONST=NSN
       AL MODELO ANTERIOR SE LE AGREGA EL EFECTO MULTIPLICADOR
      (EM) POR LA FRACCION DE SUELO OCUPADO POR LOS EDIFICIOS(FSO)
      TOMANDOSE EN CUENTA LA SUPERFICIE TOTAL(ST) Y LA DENSIDAD
      PROMEDIO DE SUELO OCUPADO POR EDIFICIO (DP)

      ED.K=ED.J+(DT)(NS.JK)
      ED=EDI
      EDI=1000
      NS.KL=(ED.K)(NSN)(EM.K)
      NSN=.07
      EM.K=TABLE(EMT,FSO.K,0,1,.1)
      EMT*=1/1.15/1.3/1.4/1.45/1.4/1.3/.9/.5/.25/0

      FSO.K=(ED.K)(DP)/ST
      ST=1000 HECTAREAS
      DP=.2 HECTAREAS POR EDIFICIO
PRINT 1)ED/2)NS/3)FSO
PLOT  ED=E/NS=N/FSO=F
SPEC  DT=.5/LENGTH=30/PRTPER=2/PLTPER=1

INPUT PHASE CONCLUDED AT  11:40 41
```

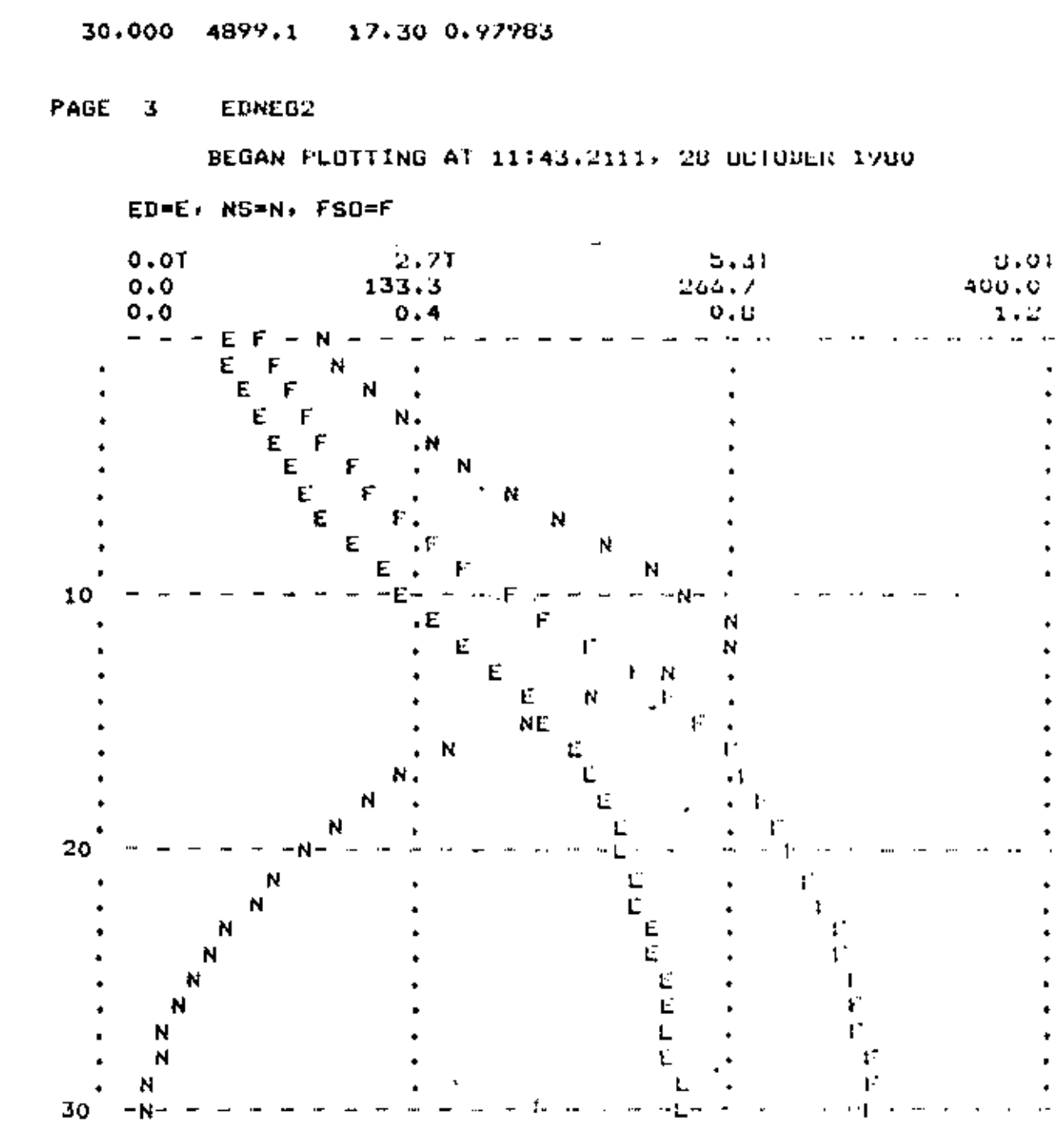
```
GENERATION PHASE BEGAN AT 11:40 42
RUN  PHASE  GENERATED AT  11:40 53
PRINT PHASE GENERATED AT  11:40 55
PLOT PHASES GENERATED AT  11:40 59

ELAPSED COMPILATION TIME      1 43


PLEASE ENTER COMPILE URB/200          WITH ALGOL.  THEN
WAIT UNTIL YOUR TERMINAL REPORTS THAT YOUR COMPILATION
IS COMPLETE.  AFTER GOOD COMPILATION ENTER  EXECUTE
URB/280


*ET=1:58.8 PT=6.1 IO=7.2
COMPILE URB/280 WITH ALGOL
*COMPILING 1906
$SET BCL RESET LIST
00001000 WARNING-BCL PROGRAMS ARE NOT PORTABLE TO EBCDIC MACHINES.
*ET=44.0 PT=12.1 IO=9.1
EXECUTE URB/280
*RUNNING 1917

PAGE  1    EDNEG2

                    11:42.5578, 20 OCTOBER 1980

          STARTED TO RUN CODE AT 11:42.5600, 20 OCTOBER 1980


PAGE  2    EDNEG2

          STARTED PRINTING AT 11:42.6347, 20 OCTOBER 1980

   TIME       ED       NS      FSO

   E+00     E+00     E+00     E+00

   0.000   1000.0    91.00 0.20000

   2.000   1197.1   112.24 0.23941

   4.000   1441.2   140.05 0.28824

   6.000   1745.9   174.11 0.34919

   8.000   2124.6   213.79 0.42492

  10.000   2579.9   249.94 0.51597

  12.000   3101.4   264.62 0.62027

  14.000   3590.3   208.03 0.71807

  16.000   3960.2   147.44 0.79204

  18.000   4227.3   114.32 0.84547
```

20.000	4435.4	87.65	0.88707
22.000	4593.2	65.39	0.91865
24.000	4710.1	47.79	0.94202
26.000	4795.0	34.40	0.95901
28.000	4855.9	24.49	0.97118
30.000	4899.1	17.30	0.97983

PAGE 3 EDNEG2

BEGAN PLOTTING AT 11:43.2111, 28 OCTOBER 1980

ED=E, NS=N, FSO=F



FINISHED RUN NUMBER EDNEG2 AT 11:44.0219, 28 OCTOBER 1980
*ET=2:15.8 PT=2.4 IO=1.9
EXECUTE DRB/280;FILE W9900(PRINTER)

INTRODUCCION A UN MODELO GRAVITACIONAL.

Plantearemos cómo realizar la simulación del fenómeno de la atracción entre dos polos de masa M1 y M2 a una distancia D uno de otro y con las siguientes condiciones:

- M1 tiene un crecimiento exponencial determinado por condiciones propias.
- M2 Crece proporcionalmente a la fuerza de atracción F
- La distancia D entre los polos disminuye proporcionalmen al valor de F.

Si usamos la Ley de Keppler que dice: "La atracción de los cuerpos es directamente proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de las distancias de los cuerpos",usando la siguiente formula:

$$F = G\ M1\ M2/D^N$$

Tenemos las siguientes ecuaciones DYNAMO:

```
M1.K=M1.J+(DT)(TM1.JK)
M1=
TM1.KL=(M1.K)(TNM1)
TNM1=
F.K=(G)(M1.K)(M2.K)/D1.K
G=
D1.K=EXP(C)
C=(N)(LOGN(D2.K)
N=
D2.K=D2.J+(DT)(TD.JK)
TD.KL=(TNA)(F.K)
TNA=
M2.K=M2.J+(DT)(TM2.JK)
M2=
TM2.KL=(TNM2)(M2.K)(F.K)
TNM2=
```

Se sugiere al usuario revisar el modelo anterior,formular el diagrama causal y el diagrama DYNAMO y procesarlo,determinando los rangos de valores congruentes con la realidad.

XIV OTRAS APLICACIONES

Los modelos de simulación permiten resolver una gran cantidad de problemas , donde otros métodos resultan muy difíciles o no aplicables.

Al realizar el proceso de la creación del modelo de simulación, lo que se hace es identificar las variables que son relevantes en el contexto del problema,dándoles su valor real.Se investiga el porcentaje de crecimiento o variación de estas variables, su relación entre ellas y los parámetros que las controlan. Al hacer variar la variable tiempo, las variables actuan según los valores preestablecidos en el modelo y nos permiten ver su comportamiento. Al estudiar este comportamiento podemos cambiar - algunos datos iniciales con objeto de lograr que el valor de - las variables oscile entre valores deseados o que tienda a ciertos límites.

Si fuera el caso que estuviéramos modelando un sistema cuyo comportamiento histórico es conocido,estos valores nos servirán para adecuar el valor de los parámetros de tal manera, que el modelo al ser procesado en la computadora repita el proceso histórico, extrapolando su comportamiento para un número futuro de años. Este trabajo se conoce como calibración del modelo.

Veamos a grandes razgos los campos de aplicación que tienen los modelos de simulación dinámica:

En la Industria:

> Existe desde hace aproximadamente unos 15 años un campo conocido como la "Dinámica Industrial" en donde se simula todo el proceso industrial, desde la producción y formación de inventarios hasta su distribución y comercialización. Se contemplan también los principales flujos de caja y diversos impactos en la industria como son los efectos de la publicidad en las ventas, el aumento o disminución en los inventarios,etc. La simulación permite a los directores de la industria tomar decisiones anticipadas

a la ocurrencia de los eventos,"probándolas" en los modelos de simulación.

En Planeación: Desde hace algunos años se usa la simulación para resolver problemas de Planeación , basta con que se identifique algún problema, se determinen sus variables relevantes y se cree el modelo de simulación para que puedan probarse políticas que de no probarse en un modelo de simulación, en la realidad, además de ser mucho muy caras, crean efectos sociales irreversibles.

En Planeación Urbana: Se han creado modelos urbanos de grandes ciudades y pequeños poblados para la prueba de políticas.

En la Planeación Regional: Se han modelado las principales variables regionales para cuestionar la Economía Regional como en el caso del Estudio del Vaso del Río Susquehanna en Estados Unidos,en los Estados de Maryland, Pennsylvania del centro y el sur del Estado de Nueva York en 1962.

En Ecología: Las componentes de los sistemas ecológicos se han estudiado aisladamente y apenas hace pocos años se ha iniciado el estudio global de todo el sistema . Los modelos de simulación permiten controlar el comportamiento del sistema. Existe un modelo clásico de la relación entre Predadores y Presas (conejos y coyotes) de Nathan B. Forrester del Instituto Tecnólogico de Massachusets.

En Ingeniería Sanitaria: Hay varios modelos de simulación que simulan el desarrollo de una epidemia, muestran la propagación de ésta y su posible control. También es posible simular el comportamiento de pozos,desarrollo de bacterias,etc.

En la Física:	Se han desarrollado una gran cantidad de modelos para simular suspensiones mecánicas, fenómenos de amortiguación variable, procesos en general, fenómenos de flujo, temperatura, presión, etc. Y en general en todos aquellos fenómenos que tengan una tasa de cambio son susceptibles de simularse.
En Administración:	Hay modelos para simular los procesos Administrativos y modelos sobre varios problemas en la Administración.
En Arquitectura:	El campo ha sido poco desarrollado pero tiene muchísimos alcances, sobre todo en las áreas de Tecnología, Urbanismo y Restauración.
En Medicina:	Se usan mucho los modelos para simular el comportamiento de diversos órganos internos para medir su comportamiento con diferentes estímulos.
En Química:	Se pueden simular procesos para control, monitoreo e investigación.
En C. Sociales	Hay modelos sobre el uso de narcóticos, sobre sistemas sociológicos, educativos, etc.
En Investigación:	La construcción de modelos orienta a la investigación cuando se están creando modelos, pues se requieren verificaciones de hipótesis que a veces sólo son posibles simulando.
Otros Campos:	Finanzas, Psicología, Comercio, Biología, Astronomía, Geología, Geografía, Derecho, etc.

XV. BIBLIOGRAFIA

En los siguientes libros y manuales se pueden encontrar más ejemplos y algunas características de diversas versiones.

1. DYNAMO II USER'S MANUAL. Fourth edition,Alexander L. Pugh III,1973 MIT Press.
2. DYNAMO USER'S MANUAL BURROUGHS 1975 y 1972.
3. A MODEL FOR SIMULATING DYNAMIC PROBLEMS OF ECONOMIC DEVELOPMENT.Edward P. Holland,Benjamin Tencer y W. Gillespie. Center for International Studies MIT,1960.
4. PRINCIPLES OF SYSTEMS, 2 ed. Jay W. Forrester 1968.
5. INDUSTRIAL DYNAMICS Jay W. Forrester MIT, 1977.
6. URBAN DYNAMICS Jay W. Forrester MIT
7. PROBLEMS IN INDUSTRIAL DYNAMICS MIT W. Edwin Jarmain
8. SYSTEMS SIMULATION FOR REGIONAL ANALYSIS,AN APPLICATION TO RIVER BASIN PLANNING, Hamilton,Goldstone. MIT 1969
9. WORLD DYNAMICS Jay W. Forrester
10. THE LIFE CYCLE OF ECONOMIC DEVELOPMENT ,Nathan B. Forrester.
11. INTRODUCTION TO.URBAN DYNAMICS Alfeld Louis, MIT, 1976.
12. STUDY NOTES IN SYSTEM DYNAMICS, Michael Goodman.
13. Simulation Modeling Forrest Paul Wyman John W.1970.
14. System Simulation,Geoffrey Gordon,Pentice Hall,1969.
15. Análisis y Simulación de Sistemas Industriales,J.W. Schmidt, R.E. Taylor. E. Trillas ,1979.
16. Computer Simulation Experiments with Models of Economic Systems. Thomas H. Naylor,John Wiley, 1971.
17. Técnicas de Simulación en Computadoras, Naylor,Balintfy, Burdick,Kong Chu,Limusa,1973.
18. Aplicación de Computación a la Ingeniería ,Murray Lasso, Chicurel U.,Limusa,1975.
19. Simulation Model Building,Urban Norlen,John Wiley,1975.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

PAPEL DE LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN MEXICO

DR.EDUARDO RIVERA PORTO

NOVIEMBRE, 1980

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

INTRODUCCION

PAPEL DE LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN MEXICO.

Una de las manifestaciones más evidentes de la evolución y grado de desarrollo de una economía, es el comportamiento del sector transporte, ya que el desplazamiento de personas y el intercambio de bienes son elementos que reflejan la marcha del proceso productivo y el aprovechamiento de sus recursos. En términos de planificación el sistema de transporte no solo es un indicador de la presencia o ausencia de planes coherentes de desarrollo regional o nacional, sino también una de las pocas variables realmente controlables que tiene el Estado para incidir indirectamente en renglones tales como descentralización, redistribución regional del ingreso, distribución demográfica, desconcentración industrial, explotación de recursos naturales, acumulación de capital, empleo, etc.

En México el problema de la incomunicación terrestre ha ocupado un sitio preponderante. Muchas páginas de nuestra historia, que registran consecuencias catastróficas, se derivan fundamentalmente de la incomunicación. Basta señalar que la ausencia de vías adecuadas aunado con un deficiente sistema de almacenamiento contribuye a la pérdida de más de 40% de ciertas cosechas, o el hecho

de que la mitad de nuestro territorio, está aún marginado, dejando regiones enteras casi sin explotar y cuyos habitantes no han podido incorporarse al país y a menudo son víctimas directa o indirectamente del caciquismo (líderes locales).

Hay que apuntar además que la red troncal de carreteras y ferrocarriles refleja las diferencias regionales. Ésta cubre con bastante frecuencia las áreas más desarrolladas, pero no se puede afirmar lo mismo de las redes alimentadoras. Este hecho determina que un gran número de centros de población no cuentan con una comunicación adecuada y, por tanto, que una elevada porción de la población del país no se encuentra plenamente incorporada al progreso general de la nación.

Ante esto, es claro que el problema no solo es técnico (satisfacer una demanda), sino también político y estratégico para el futuro desarrollo del país, sujeto a restricciones de presupuesto y de viabilidad técnica; por lo que de alguna manera se tienen que incorporar en la metodología para la determinación de una política de transporte a largo plazo.

METODOLOGIA, PLANEACION Y FACTIBILIDAD.

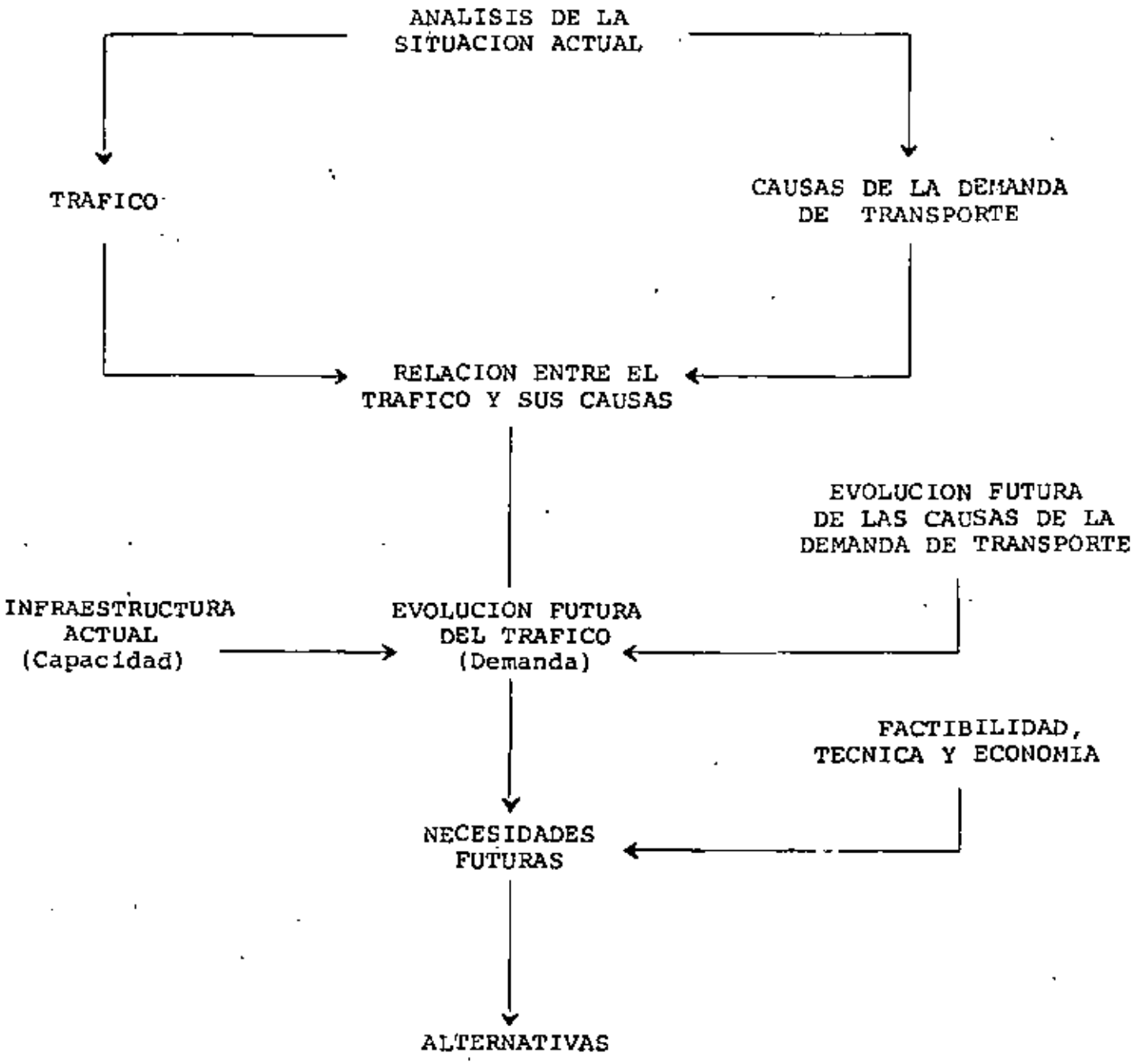
El proceso de toma de decisiones para alternativas futuras en transporte (ver figura N° 1), a la base es una confrontación

entre la demanda previsible futura de transporte y la capacidad de la infraestructura actual. Sin embargo, la previsión de la demanda debe ser cambiada por la evolución de causas que originan la demanda que son de triple naturaleza (demográfico, económico y factores de planeación). La infraestructura actual merece ser estudiada para comprender la situación de la utilización actual de las vías y rutas que componen a la red (no siempre se usa la ruta más corta).

La toma de decisiones necesita la generación de posibles soluciones y el descartar algunas de manera lo más racional posible fundamentalmente a través de dos tipos de criterios, por un lado la factibilidad técnica de la construcción y mantenimiento de una ruta en la que los expertos evalúan una serie de factores como pendientes, curvas, material local disponible, túneles, puentes, etc.; por otro lado la factibilidad económica, es decir, en función de lo anterior se estima "a grosso modo" el costo de las posibles alternativas y el empleo de tramos en común.

Entre los factores de planeación que pueden influir más en la demanda de transporte es la voluntad expresa de reordenamiento territorial y las medidas que se tomen para el caso.

En el seno de la problemática actual en materia de conformación urbana, dado el crecimiento demográfica e industrial



ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGIA

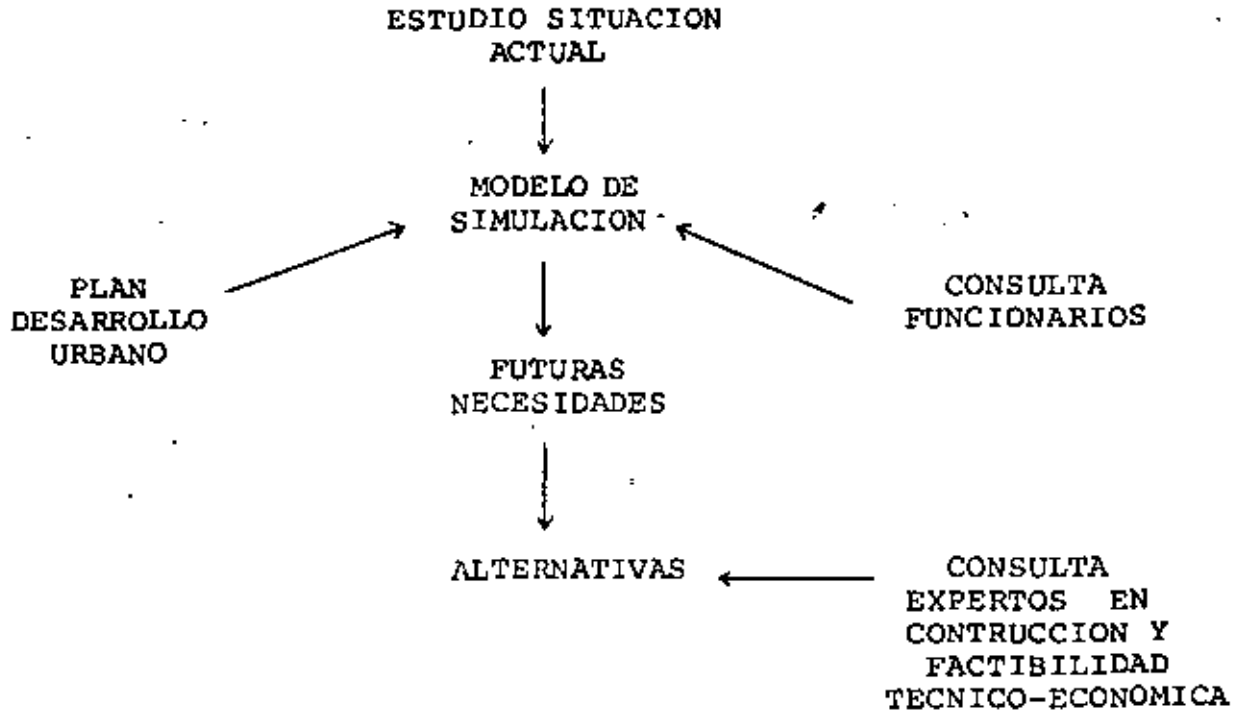
Figura N° 1

caótico, el Gobierno Federal de México elaboró el Plan Nacional de Desarrollo Urbano el cual contiene algunos lineamientos en cuanto a política de transporte. El Plan, presenta una estructura de objetivos, metas y políticas en la cual subyace un concepto fundamental: racionalizar la distribución de las actividades económicas y de la población, en el territorio, localizándolas en las zonas de mayor potencial del país. El Plan, es una imagen espacial que se pretende alcanzar. El transporte (en materia de infraestructura) es una variable más a considerar dentro de esa imagen. De ahí la importancia de su estudio y toma en consideración para sugerir algunas alternativas para su planificación.

El Plan considera muy importante la desconcentración del área Metropolitana de la ciudad de México y el privilegiar a futuras metropolis intermedias industriales situadas principalmente en la frontera norte lejana al centro, en las costas y en una periferia.

Otro de los factores de planeación, son sin duda alguna la voluntad de los planeadores al respecto, se hizo una consulta muy amplia a los principales funcionarios respecto a sus espectativas en términos de transporte.

La parte central del estudio (ver Figura Nº 2) la constituyó un modelo de simulación, ya que se consideró muy importante poner en relieve los distintos elementos que configuran las futuras demandas de transporte y en experimentar el funcionamiento dinámico de los principales factores que intervienen ya sea en la demanda tendencial, ya sea en las alternativas que se van proponiendo. Por lo que la experimentación en forma estructurada a través de la simulación permite aprender mejor el funcionamiento del sistema de transporte y sugerir mejores soluciones.



ETAPAS EN LA METODOLOGIA

Figura Nº 2

CONSIDERACIONES E HIPOTESIS PARA UN MODELO.

El sistema de transporte consta de 3 subsistemas: el de infraestructura, el de vehículos, y el de operación, donde cada uno de ellos cumple con un propósito específico, que necesita de la correcta operación de los otros tres para el buen funcionamiento del sistema.

El modelo pretende proporcionar una metodología que permite distinguir diferentes alternativas, a mediano plazo y su evaluación en lo concerniente a infraestructura del transporte en sus dos modos, es decir, construcción de carreteras y construcción de vías y estaciones de ferrocarril.

El aspecto espacial se considera el objeto del modelo por lo que el resultado esperado son configuraciones posibles y deseables de la infraestructura terrestre.

El modelo se basa principalmente en las características cuantitativas tendenciales de flujo de la red puestas en función del crecimiento de la población; esto implica suponeer que el crecimiento industrial económico para intercambio sea función directa de la población.

Por otra parte se despreció las características de innovación tecnológica en el transporte terrestre, ya que se consideró según los expertos en una posibilidad a más largo plazo y que las acciones del presente en materia de construcción de infraestructura no pueden tomar en cuenta las innovaciones futuras. Tal vez ésto sea un error puesto que el plazo considerado (20 años) es demasiado grande y se traslapa con ciertas previsiones sobre energéticos y precios de transporte que pueden fácilmente alterar las preferencias de uso de los modos de transporte e incluso forzar a la innovación tecnológica; sin embargo se guardó como hipótesis del trabajo.

Otra hipótesis fundamental consistió en utilizar datos normativos respecto a la población y su distribución futura; obtenidos del Plan Nacional de Desarrollo Urbano (PNUD). Esta selección aunada al deseo de simplificación lleva a considerar como nodos de la red de transporte a las ciudades prioritarias de desarrollo del plan, aunadas con ciudades ya importantes en producción o consumo y lugares únicos de conexión entre rutas. Estos nodos se supuso concentran la población y actividad del área circunvecina.

Además de los nodos de transporte (carretero y ferroviario) era necesario hacer una división entre el transporte de mercancías y el transporte de pasajeros; ya que los factores de demanda de transporte son diferentes en ambos casos.

EL MODELO

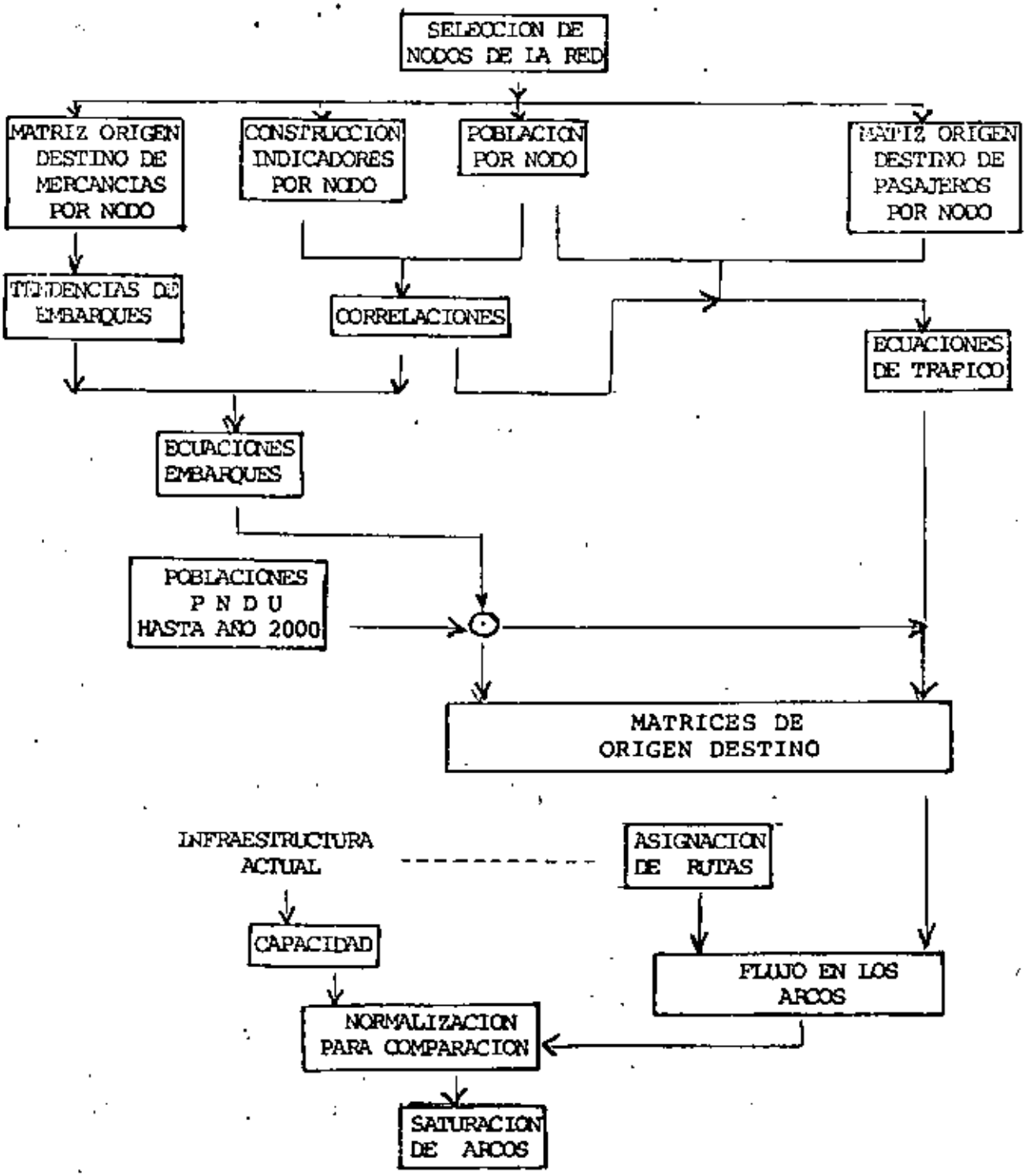
Como se muestra en la figura N° 3, la primera etapa del modelo propiamente dicho, consiste en la selección de nodos de la red. Tal selección se hizo en base a las ciudades prioritarias del PNDU adjuntándole las ciudades necesarias para entronques y ciudades de importancia actual aunque no sean consideradas en el plan.

A partir de ahí se tomó cada nodo de la red como una región que concentra las actividades y la población de la zona circundante. La determinación de las áreas de influencia fue una tarea delicada, cuyo elemento de base fue la división municipal basada en la configuración carretera y su flujo alrededor de tales nodos.

De aquí se procedió a la construcción de matrices origen-destino tanto de mercancías como de pasajeros por nodo (carretero y ferroviario), para diferentes años. Simultáneamente se probaron diferentes indicadores socio-económicos con objeto de asociar ese crecimiento con los flujos tanto de mercancías como de pasajeros. Se retuvieron seis indicadores con alta correlación para el flujo carretero: Población total, número de vehículos, capital en el sector industrial, producción agrícola, población económicamente activa en la industria y población económicamente

DIAGRAMA DEL MODELO

Figura Nº 3



activa en los servicios.(1) Para el caso del ferrocarril resultaron las mismas variables, excepto el número de vehículos y la población económicamente activa en servicios; resultados esperados sabiendo que la gente que trabaja en los servicios prefiere normalmente desplazarse en medios más rápidos que el ferrocarril (en su forma actual).

En las matrices se acumularon los embarques y los desembarques por cada nodo. Después, estos totales se pasaron a tráficos y se procedió a la prueba de regresión múltiple con las variables mencionadas.

Todas las variables tuvieron una alta correlación a excepción de la producción agrícola. Del análisis de resultados se pudo apreciar también la alta correlación que guardaban las variables con la de población, lo cual simplificó la búsqueda de datos y permitió validar la ejecución del modelo con los valores demográficos calculados en el P.N.D.U. para el año 2000.

Para encontrar los coeficientes de la ecuación del tráfico en función de la población se cuidó en disminuir el error, definiendo grupos de ciudades que correspondieran a una misma recta en el plano tráfico vs población, obteniendo varias ecuaciones tipo.

(1) Los valores de los tráficos en carreteras y los de las 6 variables se obtuvieron de: Unikel L., "El Desarrollo Urbano de México" El Colegio de México, México, D. F. 1976, y Kordo J., "Tendencias de la Urbanización en la República Mexicana", Inst. de Ing. U.N.A.M., 1974; en cuanto a tráfico de ferrocarriles los datos se obtuvieron de: S.C.T. "Estadística Ferroviaria Nacional", México 1972.

El siguiente paso consistió en tomar las proyecciones de la población para el año 2000 de las ciudades seleccionadas del P.N.D.U. y deducir la generación de flujos en cada nodo. Como se consideraron 2 hipótesis de crecimiento demográfico se realizaron 2 escenarios, cambiando únicamente los datos de población.

Teniendo en cada nodo el dato de flujo generado en el año 2000 se procedió a encontrar la matriz origen-destino usando los porcentajes de distribución observada en el año base y ponderándolos por la nueva estructura de población. Se planteó la relación inversa entre Tráfico y Producción, lo que constituye una innovación en los modelos de transporte cuando tal función requeriría de un modelo económico muy complejo*.

Se ajustó la matriz origen - destino haciendo iteracciones nodo por nodo, de tal manera que se proyectaba la producción total (y con ello la industrial), en el nodo origen se modificaban los desembarques de estos tipos de productos. Como esto cambiaba los totales de elementos (destinos) de otros nodos, se ajustó

* Otra razón importante para hacer esto, fue el hecho de que los nodos no corresponden con la división estatal para lo cual se disponen de buenos datos y las zonas de influencia alrededor de cada nodo no están claramente en lo que a producción se refiere.

la producción de ellos en forma iterativa de tal manera que concidiera su mayor embarque de materias primas y productos intermedios, con el aumento de su producción en esos renglones.

Establecidas las matrices origen destino para el año 2000 se procedió a buscar los flujos por arcos de la red. Para ello se establecieron los recorridos fundamentales de la red. El criterio de asignación que pretende simular el comportamiento del usuario, no ignoró el hecho de que no todos los usuarios tienen el mismo valor del tiempo, y que por ello además de otras razones, existe en la realidad tráficos sobre todos los itinerarios y no sólo sobre los de ruta mínima*.

También se reconoció el hecho de que algunos usuarios preven mayor tráfico en rutas atractivas y que eso ocasionaría mayor pérdida de tiempo en el recorrido.

A continuación se hizo circular por los arcos los volúmenes entre orígenes y destinos, acumulando los valores en cada uno. Los valores obtenidos se compararon con los actuales y con los de capacidad teórica.

Como el Plan propone un ordenamiento territorial dando los volúmenes demográficos a lograr en el país (104 millones de

---

* Se han hecho varios estudios para calcular el valor del tiempo, principalmente en función del ingreso. Uno de ellos, realizado en Francia obtuvo que: para los ingresos más bajos la relación salario hora/valor del tiempo fue de 1/4 y de 1/5, para los ingresos medianos de 1/3, y para los más altos fue de 1.

habitantes) en contra de lo que se obtendría si se siguiera la tendencia histórica (130 millones de habitantes). El modelo pretende mostrar las implicaciones de los dos escenarios demográficos del Plan, en la estructuración de la red de enlaces terrestres para el año 2000.

Bajo las dos hipótesis el patrón de flujos cambiará según los pronósticos de crecimiento de población y la consecuente hipótesis de cambio de movilidad.

Hasta aquí, la metodología (ver figura N° 4) descrita, sirvió para encontrar los flujos de demanda de transporte en el año 2000, los siguientes pasos fueron localizar los arcos saturados para de ahí sugerir la modificación de la oferta (capacidad) de la infraestructura de transporte.

Es claro que subsisten problemas respecto a la estimación de la saturación:

- La saturación se da en horas y días pico o inclusive períodos (como los vacacionales).
- Las condiciones del tiempo o si se está reparando las vías o carreteras.
- La existencia de zonas de mala visibilidad, pendientes fuertes o curvas, que hacen disminuir la velocidad de los vehículos.

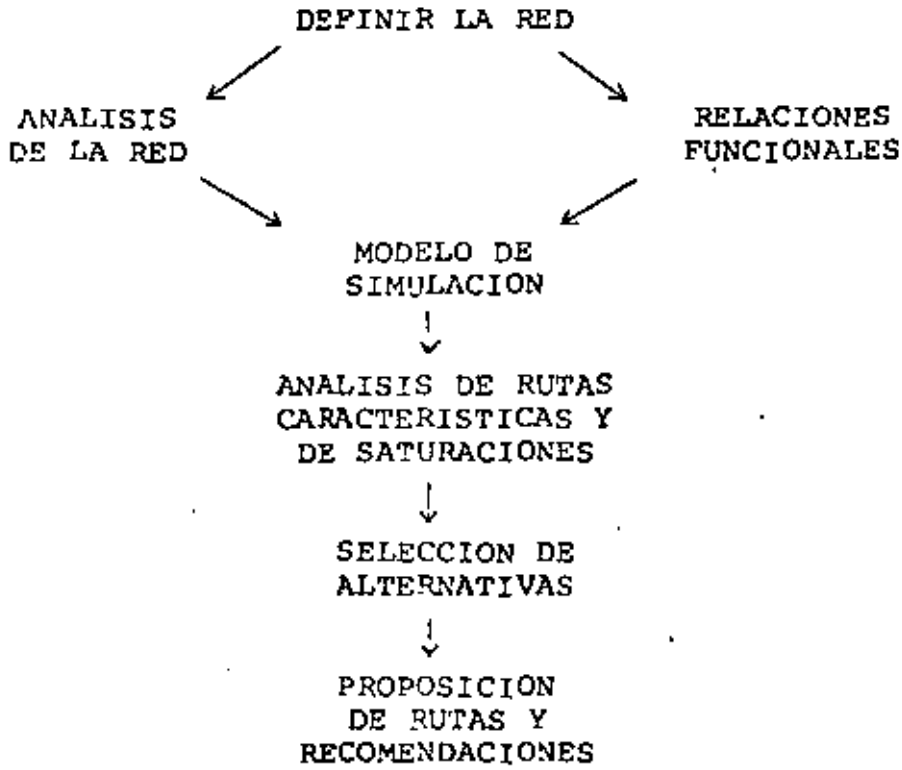


Figura Nº 4

La frecuencia y tipo de vehículos o trenes y la velocidad promedio*, etc.

Se tomaron los estimadores de capacidad teórica ya conocidos por la Secretaría de Comunicaciones como buenos, aunque pensamos que valdría la pena revisarlos, actualizarlos y hasta poder sugerir cambios (como un carril más en pendientes fuertes, etc.)

---

* Cuando un nuevo vehículo entra en una autopista congestionada, este nuevo vehículo influye al conjunto de los otros vehículos una pérdida de tiempo igual a 10 veces el tiempo que pasa en esa autopista. Tomado de "Límites para el transporte", Jean Robert, ATA, Palmira, Cuernavaca.

y planificación en estos parámetros, que permitan descongestionar al menos por un tiempo las vías congestionadas y que ciertamente saldría más económico que realizar nuevas vías y obras de infraestructura.

Existe también un problema en cuanto al grado de utilización del equipo transporte de carga, es decir de ferrocarriles y camiones de carga. Según un estudio del primer Plan Nacional de Transporte, sólo se utiliza el 55% en promedio de la capacidad del autotransporte para carga, y 33% para el ferrocarril según cálculos nuestros que toman en cuenta volumen, toneladas por vagón y número de vagones. Estos porcentajes en buena medida se explican por:

a) Los tiempos muertos en cargar y descargar mercancía.

b) Espera de la misma.

c) Descomposturas, y

d) Viajes de regreso sin mercancía.

De acuerdo con los expertos una automatización y programación de viajes, reparaciones, revisiones, almacenes y equipo de carga y descarga podrían aliviar en mucho estos problemas; sin embargo, en lo referente a viajes de regreso sin mercancía, el problema es sin duda más difícil por la especificidad de la carga y su dependencia de un calendario. Es posible mejorar esta última situación con una gran planificación, tanto de almacenaje adecuado de mercancía (principalmente para artículos perecederos), planificación del consumo y de la producción, adecuación de vehículos

a la magnitud de la carga y flexibilidad para transportar tipos de carga muy diversos, se piensa que esta función se podría muy bien realizar para los grandes centros regionales en centro de almacenaje, homogeneización en el manejo de la carga y de intercambio multi-modal (vehículos pequeños - vehículos grandes, camiones - ferrocarril, etc.).

ALGUNAS CONCLUSIONES

Obviamente el modelo es altamente sensible a cambios en la población por lo que siempre es conveniente comparar los resultados de los dos escenarios de base a) Población baja en el año 2000: 104 millones de habitantes, b) Población alta en el año 2000: 130 millones de habitantes.

Así por ejemplo según las hipótesis del modelo estarán saturadas las carreteras siguientes antes de 20 años: (ver Mapa Nº 1)

a) Todas las que rodean y convergen (tienen como nodo) a la ciudad de México.

b) Querétaro - León.

c) Querétaro - San Luis.

d) Morelia - León

e) León - Guadalajara

f) Guadalajara - Tepic.

g) Tepic - Mazatlán.

h) Mazatlán - Culiacán.

i) Culiacán - Cd. Obregón.

Y a punto de saturarse:

a) Monterrey - Saltillo.

b) Cd. Obregón - Hermosillo.

Con el escenario de 104 millones en el año 2000 (ver Mapa Nº 2) los valores en los arcos son más bajos, sin embargo se encuentra la saturación carretera en los mismos arcos que en el caso anterior, a excepción de: Guadalajara - Tepic, León - Morelia y Monterrey - Saltillo.

Los resultados de los 2 escenarios hacen reflexiones sobre la difícil tarea que espera a los tomadores de decisiones. Estos resultados sugieren que debe existir una política de inversión para la ampliación de las carreteras mencionadas en el primer escenario y la construcción de algunas nuevas. Así, por ejemplo, dado el gran tráfico y saturación de la línea: Guadalajara - Tepic - Mazatlán - Culiacán - Cd. Obregón - Hermosillo, que es básicamente una ruta del Norte al Centro (específicamente Guadalajara), ésta se puede aliviar construyendo una ruta transversal Cd. Obregón - Chihuahua y Torreón - Mazatlán (vía Durango directamente).

Se propone también descongestionar una gran vía central formada por una "Y" Querétaro - León (en el centro de la "Y") - San

Luis Potosí y Guadalajara en los extremos superiores de la "Y". Una manera muy factible técnicamente es crear una carretera directa vía Querétaro - Acámbaro - Guadalajara. (Que ya no pase por León) y por otra parte se propone una extensión de la carretera México-Toluca hacia Acámbaro (descongestionando parcialmente la vía León-Morelia), dando además la opción de no seguir hasta la Ciudad de México continuando hacia Cuernavaca formando un libramiento.

Se propone además formar un círculo de libramiento más grande entre las carreteras que convergen a la ciudad de México; la que viene de Querétaro, con la de Pachuca, Puebla y Cuernavaca.

Se propone la vía corta Guadalajara-León y otro libramiento al norte de la ciudad de México entre Querétaro-Pachuca y Córdoba, (al igual que el P.N.D.U. sugiere).

Parece también deseable pensar en un libramiento que circunde al eje Monterrey-Saltillo, lo que aliviaría el tráfico entre Monterrey y Saltillo.

Los exámenes de viabilidad técnica con los expertos, sugirieron además no restringirse absolutamente a los enlaces propuestos por el P.N.D.U. y observando la red carretera (y pasa lo mismo con la ferroviaria) es necesario integrar más al país con tramos transversales E-O a las vías Norte-Sur que en general se deben ampliar.

Desde esta perspectiva parece prioritario: Conectar Chihuahua con la costa de Sonora de ésto lo más viable es conectar Cd. Obregón con Chihuahua construyendo solamente el tramo San Nicolás-Yepachic. Otro eje estaría entre Culiacán y Tampico como señalamos vía Torreón y de Torreón a Cd. Victoria (sin pasar por Saltillo) aprovechando el tramo ya existente entre Cd. Victoria y Tampico.

Otros enlaces de alta viabilidad y de desarrollo estratégico a largo plazo aunque no justificables por la magnitud del tráfico sería conectar el Puerto de Lázaro Cárdenas con Guadalajara y Lázaro Cárdenas con Coatzacoalcos. Para la primera ruta lo más viable técnicamente es completar la ruta Lázaro Cárdenas con Cd. Guzmán y de ahí a Colima y Guadalajara construyendo el tramo Buena Vista-Perinbam Para la ruta Lázaro Cárdenas-Coatzacoalcos se propone la ruta Lázaro cárdenas-Chilpancingo-Chilapa-Tlapa-Huajapan de León-Tuxtepec-Teotitlan-Coatzacoalcos. Estos enlaces están representados en el mapa No. 4.

En ferrocarriles (ver mapa no. 3) se obtuvieron valores de tráfico superiores a la capacidad en varias de sus líneas en ambos escenarios (antes de 20 años), las líneas más afectadas fueron las del centro: México-Querétaro

Querétaro-Celaya

Celaya-Irapuato

Irapuato-Guadalajara

Querétaro-San Luis Potosí

Morelia-Acámbaro

en el Noreste: San Luis Potosí-Saltillo

Saltillo-Monterrey

en el Golfo: México-Jalapa

Jalapa-Veracruz

Coatzacoalcos-Minatitlán

Minatitlán-Sayula

Sayula-Tierra Blanca,

y están próximos a su saturación:

León-Chihuahua

Tepic-Hermosillo

Saltillo-Piedras Negras

Torreón-Monterrey

Acámbaro-Toluca

Toluca-Cd. de México

Sayula-Tapachula

Córdoba-Veracruz

Veracruz-Tierra Blanca

Tampico-Monterrey

Guadalajara-Manzanillo.

En ferrocarriles los expertos coinciden en que en general es muy completa y que en la mayoría de casos el problema de las saturaciones antes mencionadas se aliviaría mejorando y rectificando tramos, electrificando o creando doble vía. Así el tramo México Guadalajara vía Quéretaro-Irapuato parece ser el punto crítico de la red ferroviaria y seguramente amerita doble vía.

Dentro de los tramos prioritarios a construir siguiendo la misma lógica de tener más rutas transversales que desahoguen a rutas Norte-Sur e integren más al país estarían: Guadalajara-Aguascalientes que conectaría las dos líneas ferreas que bajan del Norte al Centro, así mismo Durango-Mazatlán y Pachuca-Córdoba.

Otra ruta también importante es la de Tampico-Veracruz con la que se esperaría fortalecer la economía del Golfo y aliviar la carga carretera.

Las nuevas rutas aquí señaladas serían las mínimas para permitir un tráfico de pasajeros y mercancias relativamente fluido.

Aunque el panorama resulta ser grave y las tareas inmensas, hay que tomar estos resultados con relatividad, más aún cuando se sabe que el problema principal del sistema ferrocarrilero radica fundamentalmente en su operación. Conforme este sector tenga mayor eficiencia dejará de ser subutilizado y su mayor explotación y aprovechamiento atenuará la posible crisis del congestionamiento de vías. A reserva de lo anterior se propone en el mapa No. 3 las modificaciones prioritarias al sistema ferroviario.

FACTIBILIDAD

Las alternativas propuestas se elaboraron con otro elemento muy importante: la factibilidad técnica. Esto permitió que las proposiciones no fueran muy difíciles técnicamente (i.e. evitar puentes, túneles, pendientes grandes, etc.), ya que al considerar las

características topográficas de las probables nuevas rutas, así como las restricciones propias de cada sistema se hicieron sugerencias viables técnicamente respecto a los tramos precisos por donde podrían pasar las rutas; por supuesto faltaría la viabilidad financiera y la decisión política.

Respecto a la factibilidad económica es necesario hacer estudios muy detallados por tramos específicos, aunque a nivel de la macro planeación es indispensable contar con al menos algunos elementos y primeras cifras a grosso modo. Así por ejemplo se estimó en ferrocarriles la vía Durango-Mazatlán (long. de 360 Km.) con un terreno 100% montañoso en un costo de 4,320 millones de pesos. La vía Tampico-Veracruz (400 Km.) en un terreno 50% plano y 50% loma en 3,600 millones de pesos. Irapuato-Querétaro (108 Km.) en un terreno 100% loma en 1,480 millones de pesos. Sin embargo una doble vía rectificada entre México-Toluca (108 Km.) en un terreno 20% plano, 30% loma y 50% montañoso se puede elevar hasta 5,000 millones de pesos. Otro tanto se hizo para carreteras que como se sabe los costos son notablemente inferiores (en zona montañosa 5 a 6 veces inferiores) en terreno lomoso sólo 3 veces y en plano sólo 2. (No se tomaron en cuenta gastos posibles de mantenimiento).

PROPOSICIONES

El estudio aquí presentado es una simplificación a grosso modo de un enfoque sistemático para tener unos primeros elementos para la planeación prospectiva a largo plazo.

Puede dar la impresión de normas, cuando en realidad son sugestiones que ameritarían ser estudiadas y evaluadas en mayor detalle. El Plan Nacional de Desarrollo Urbano presenta mucho más sugerencias en cuanto a la construcción de nuevas autopistas, carreteras y vías ferreas, lo mismo el Plan Ferroviario o los Planes Carreteros. Aquí sólo presentamos una primera aproximación que toma como objetivo el aliviar el congestionamiento previsible tanto en carreteras como en ferrocarriles, de ninguna manera tiene otras pretensiones y debe ser completado con estudios como los del P.N.D.U. para la planeación estratégica del desarrollo regional, que aunque no necesariamente justifique por saturación la creación de nuevas vías. Tales nuevas vías de comunicación traen aparejado facilidades para un desarrollo económico. Por otra parte no se deben despreciar las pequeñas rutas tan importantes para la producción agrícola, ganadera, mineral y forestal, etc; estas no fueron tomadas en cuenta pero se está plenamente consciente de su gran importancia.

Recomendamos realizar:

1.- Un estudio más específico y local para todas las regiones respecto a las causas (o necesidades) del transporte que deberían relacionarse en cada caso con un modelo económico regional y de intercambio comercial entre regiones.

2.- Un estudio sobre medidas específicas a tomar para evitar la saturación con la infraestructura actual (horarios, estandarización de mercancías para ir en un modo u otro, planeación de envíos, construcciones limitadas (doble carril o doble vía en pendientes) etc.)

3.- Un estudio más específico de la complementaridad entre la

modos ferroviarios y carretero, inclusive definiendo vocaciones específicas en particular al ferrocarril (grandes distancias, trenes de pasajeros diferentes de trenes de mercancías, carga estandarizada, etc.). Es inegable que una buena parte de la solución a la futura demanda del transporte está en manos del sistema ferroviario y en el apoyo que éste le dé a los otros modos de transporte. Se debería tratar en el futuro que las nuevas estaciones de autobuses fueran vecinas de estaciones ferroviarias para facilitar el flujo de pasajeros que cambien de modo y crear centros de interfase en lo que respecta a las mercancías.

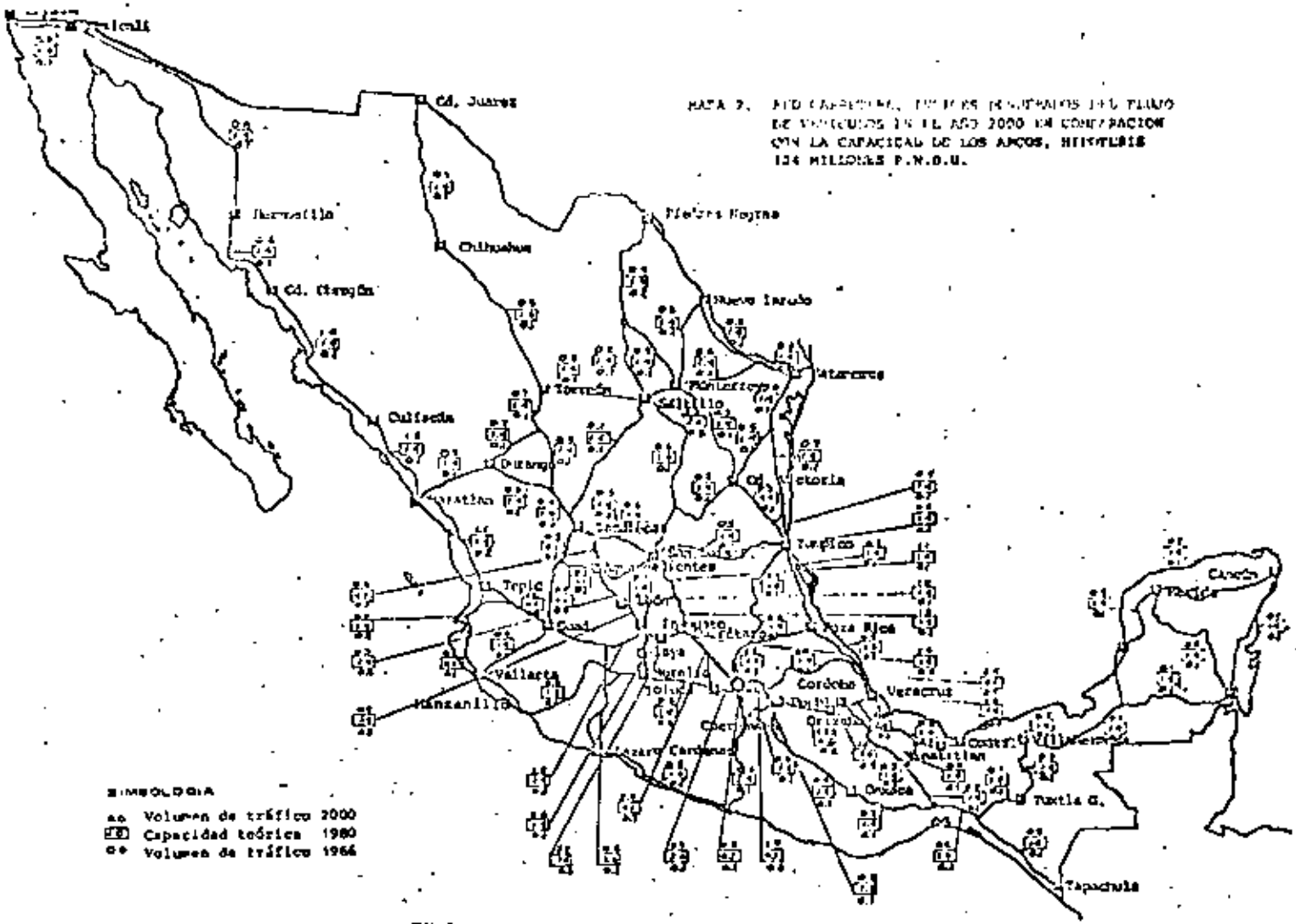
4.- Es deseable un estudio específico respecto a posibles centros de interfase, que podrían también actuar como centros de almacenamiento. En primera instancia estarían los propuestos en el P.N.D.U. reforzando las ciudades alrededor del Area Metropolitana de la Ciudad de México, Morelia, Toluca, Cuautla, Izúcar de Matamoros, Pachuca y Querétaro. Sin embargo otros expertos opinaron en el interés de crear de acuerdo con las sugerencias de nuevas rutas en considerar como posibles centros de interfase a: Guadalajara, Acámbaro, Mazatlán, Cd. Obregón, Lázaro Cárdenas, Torreón y Coatzacoalcos.

5.- Es importante el considerar los estudios específicos para utilizar otras tecnologías en el intercambio de mercancías e inclusive de servicios (a través de las telecomunicaciones estos últimos). El caso más importante es el de oleoductos y gasoductos.

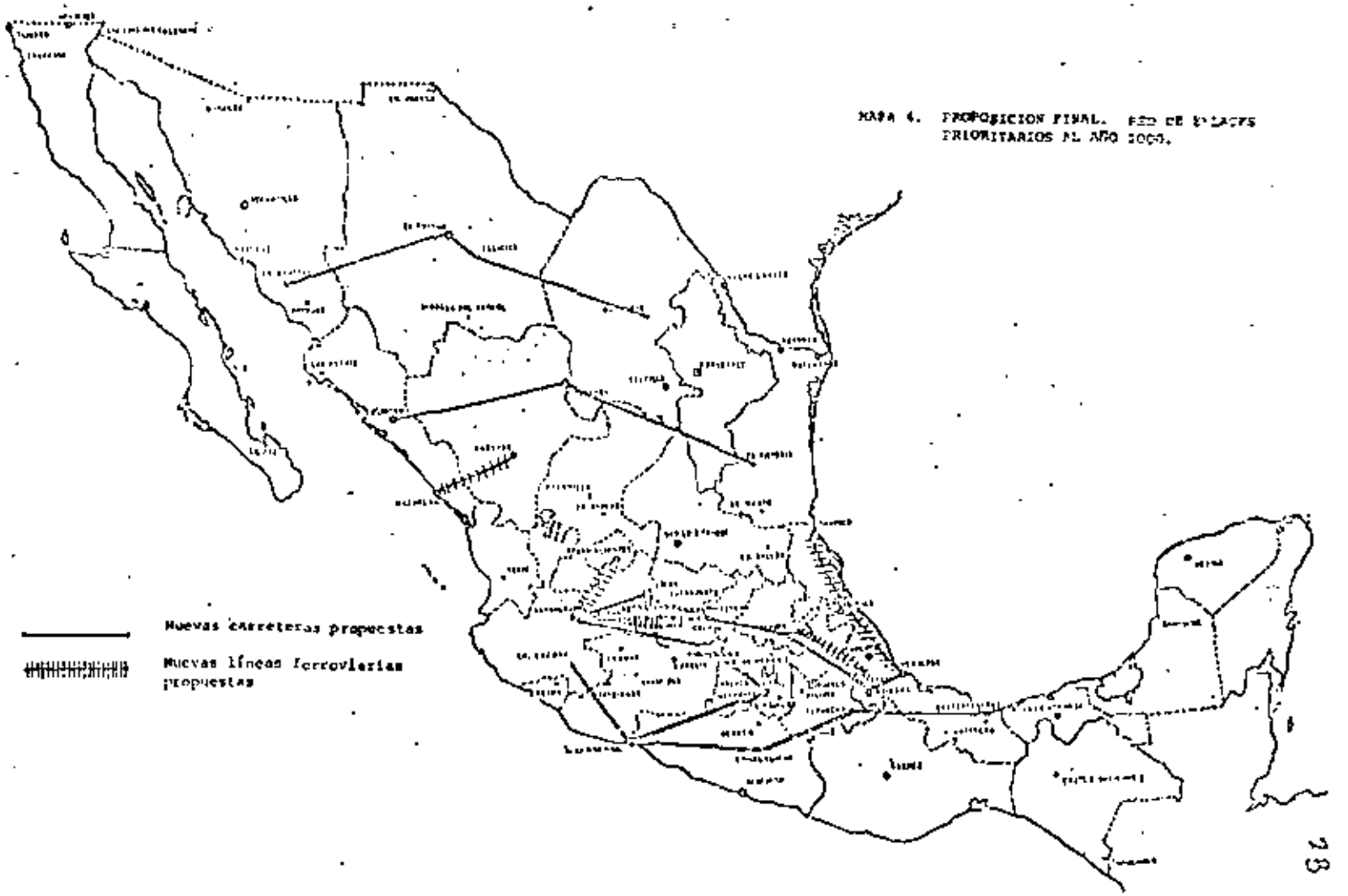
6.- Es importante considerar otras ciudades y otras áreas en la planificación de rutas, que aunque no prioritarias sea impor-

tante comunicarlas para su mejor explotación; tal sería el caso de las penínsulas de Baja California y Yucatán.

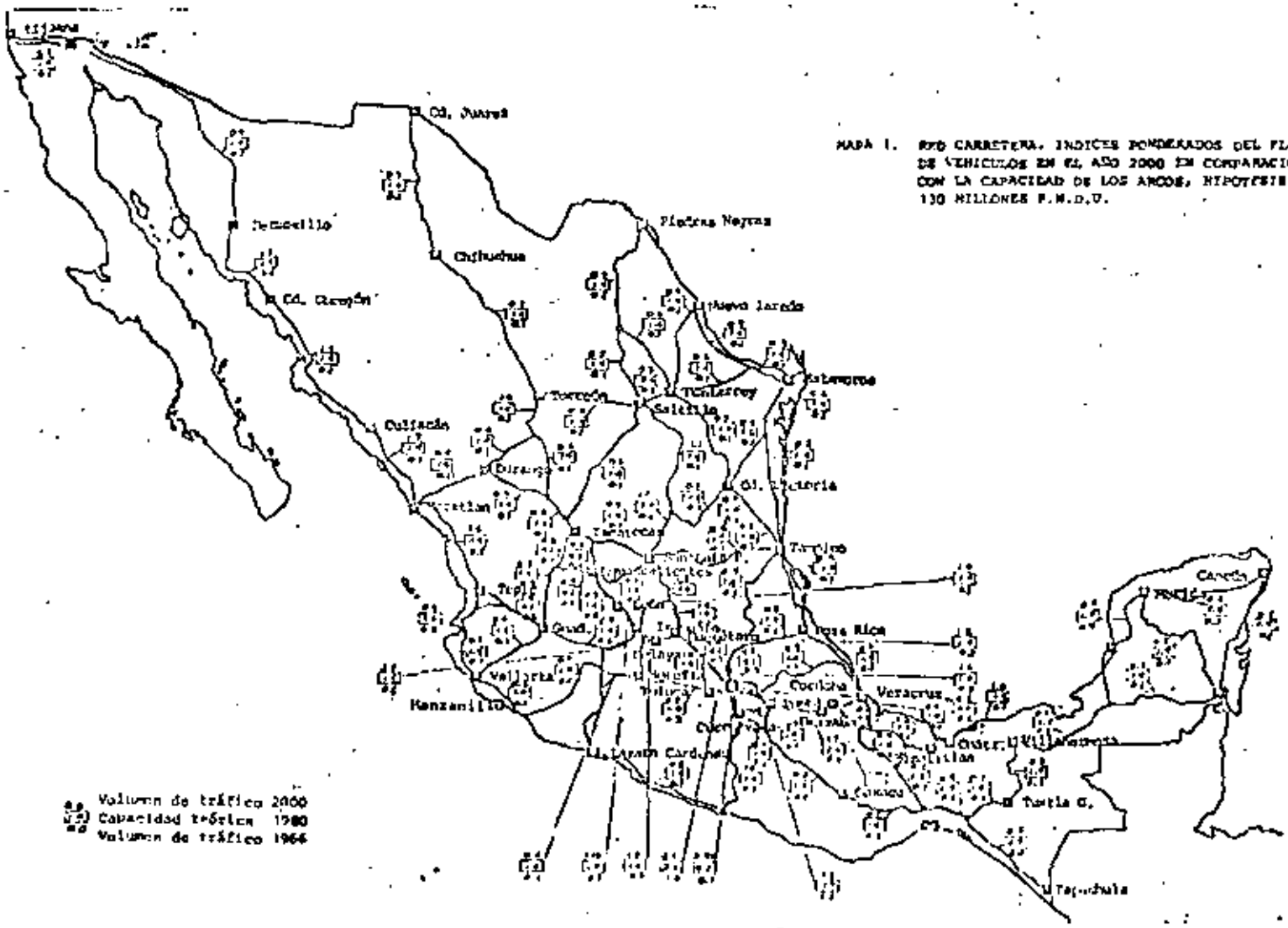
7.- Finalmente un estudio para implementar un sistema de monitoreo que permita el seguimiento de los cambios en política de transporte y en posibles causas de demanda y oferta de transporte; tal sistema debería encargarse de mejorar los datos, actualizar las previsiones, completar y desagregar el modelo.


Cd. Juárez
Hermosillo
Chihuahua
Cd. Obregón
Nuevo Laredo
Culiacán
Durango
Victoria
Tampico
Tepic
Vallarta
Manzanillo
Córdoba
Veracruz
Tuxtla G.
Tapachula
SIMBOLOGIA
Volumen de tráfico 2000
Capacidad teórica 1980
Volumen de tráfico 1966

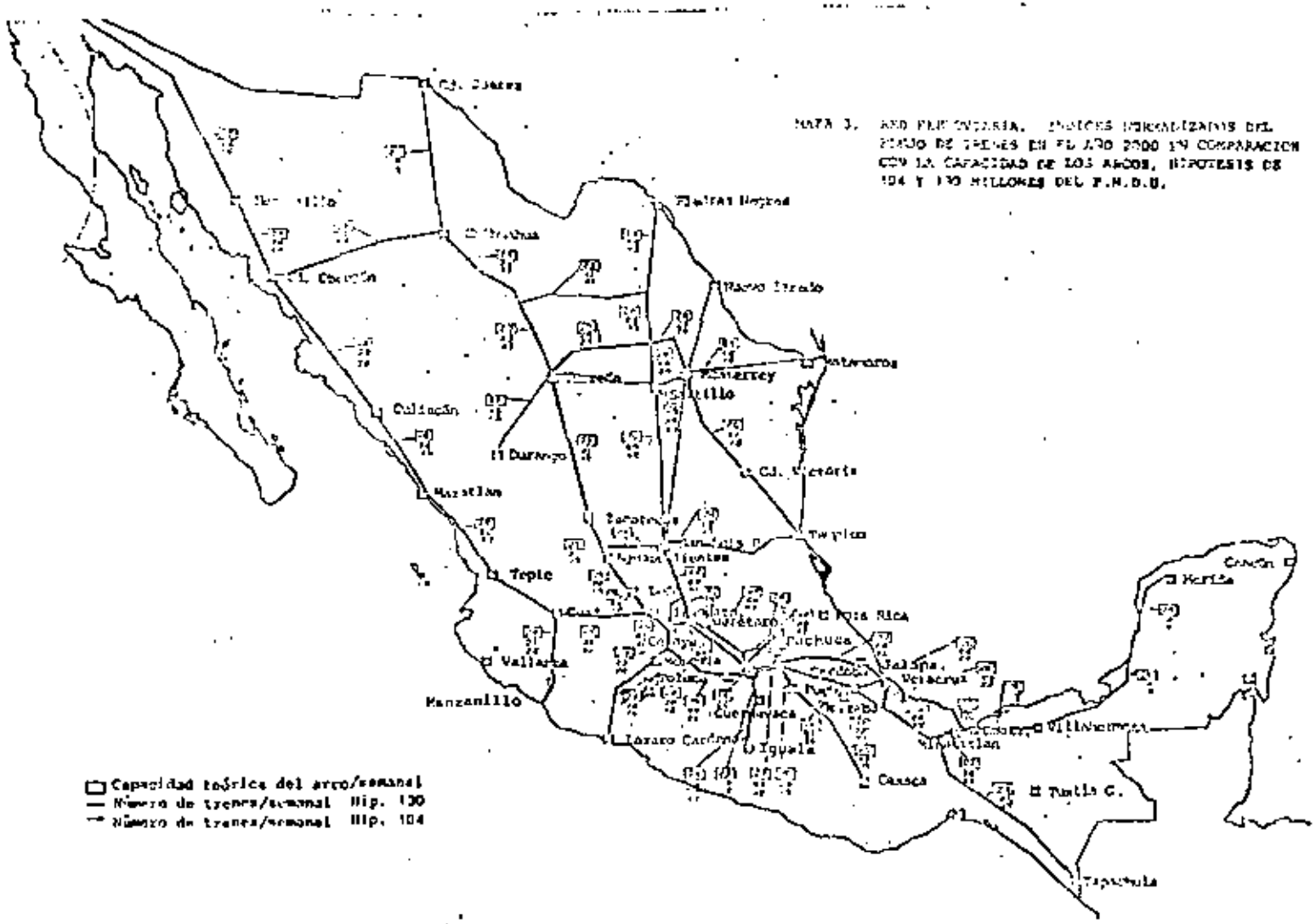
MAPA 4. PROPOSICION FINAL. RED DE ENLACES PRIORITARIOS AL AÑO 2000.



MAPA 1. RED CARRETERA. INDICES PONDERADOS DEL FLUJO DE VEHICULOS EN EL AÑO 2000 EN COMPARACION CON LA CAPACIDAD DE LOS ARCOS, HIPOTESIS 130 MILLONES P.N.D.U.



MAPA 3. RED FERROVIARIA. INDICES UTILIZACION DEL PARQUE DE TRENES EN EL AÑO 2000 EN COMPARACION CON LA CAPACIDAD DE LOS ARCOS, HIPOTESIS DE 104 Y 130 MILLONES DEL F.N.D.U.



B I B L I O G R A F I A

Colegio Ingenieros Civiles de México "El Camino Elemento Fundamental de Desarrollo con Justicia Social" Texto de la conferencia dictada por el Ing. Luis Enrique Bracamontes, México, D. F., julio 1975.

Díaz Díaz, Daniel "La Infraestructura del Transporte", El Perfil de México en 1980, Ed. Siglo XXI, México, D. F. 1979.

Lara Rosano, Felipe "Metodología para la Prospección de la Red de Transporte" (Reporte) Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., México, D.F. 1974.

Lara Rosano, Felipe "Prospectiva del Sistema de Transporte Interurbano de México", Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., México, D.F. 1975.

SAHOP, CNDU y S.P.P. "Plan Nacional de Desarrollo Urbano, Nivel Normativo" Libro I, México, D. F. mayo 1978.

S.C.T. "Primer Plan Nacional del Trnasporte" (Aspectos Metodológicos) Libro II, México, D. F. marzo 1976.

Rivera Porto, Eduardo "La Simulación en la Prospectiva, Cuaderno Prospectivo No. 14 - A, Fundación J. Barros Sierra, México D. F., 1977.

Bravo E, C "Un modelo de simulación de transportes Urbanos" Tesis Licenciatura Actuaría, Facultad de Ciencias, U.N.A.M., México 1973.

Bellman H, "Transportation in the World of the Future" Evans, N. Y. 1974.

Jonchay de Y., "Les Grands Transports Mondiaux" Bordas, Paris 1978.

Commissariat général du Plan, "Prospective des Transports de 1975 a 1990", La Documentation Francaise, Paris 1977.

Frybourg M., "Les Systemes de Trnasport, planification et décentralisation" Eyrolles, Paris 1974.

Hamilton H. J., "Monitoring change for multimodal transportation planning" Center for Futures Research, University of California, Los Angeles, 1973.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

INFRAESTRUCTURA DEL SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE EN EL AÑO 2000

(Modos carretero y ferroviario)

M en I Arturo Talavera Rodarte

Noviembre, 1980

o de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA PROBLEMATICA

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.3 MARCO DE REFERENCIA

1.4 PARADIGMA DEL PROBLEMA

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA PROBLEMATICA.

Una primera aproximación a la problemática es la siguiente:

Constantemente se están construyendo y modernizando carreteras, asignándose para esto una buena cantidad de recursos. En materia ferroviaria también se invierte una gran cantidad de recursos. Dada la importancia que tiene y tendrá el *transporte terrestre*, tanto a nivel de *infraestructura* (red), como de *estructura* (configuración topológica de la red), en materia de conformación urbana, acomodo demográfico y desarrollo económico, se visualiza la necesidad de contar con un esquema a largo plazo de lo que deberá ser la red del sistema de transporte terrestre en el año 2000, así como determinar el papel que deberá cumplir la red ferroviaria, así como que características deberá tener. Y en paralelo: ¿cómo deberá ser la red carretera? ¿qué estructura, densidad, conformación y características deberá tener?

Por lo tanto es inquietante y preocupante, que no se tenga bien definida una *visión* a largo plazo (año 2000) en materia[1] de *transporte terrestre*. Además hay el problema de que un *foco de decisión* está en una secretaría y el otro foco de decisión este en otra[2], y que actualmente existe una falta de coordinación y diversidad de intereses entre ambas, y no puedan *un poco* compartir decisiones.

De lo anterior se visualiza el fin primordial de este estudio, es decir, que el patrocinador proponga con base en una *imagen al futuro* del sistema de transporte terrestre, en el cual se contemple una complementaridad entre ambos modos, el compartir *decisiones actuales*, con el fin de alcanzar esa imagen objetivo[3].

---

1 Y particularmente a nivel de *infraestructura*.

2 Ya que la planeación de ambos modos se hace en *forma independiente*.

3 La cual podría ser la propuesta por el patrocinador, o una definida en forma conjunta, pero tomando como base esta imagen objetiva inicial.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

Con el fin de apoyar al patrocinador[1] en su *proceso de toma de decisiones* de inversiones en cuanto a la infraestructura (a mediano plazo) del sistema de transporte carretero, pero de tal manera que se visualice su *complementaridad y/o integración* con el sistema de transporte ferroviario. El *objetivo general* de la investigación es:

"Tener una visión prospectiva (año 2000) del posible desarrollo de la *infraestructura* (red) del Sistema de Transporte Terrestre en sus modalidades carretera y ferroviaria".

Teniéndose además los siguientes objetivos específicos:

i) Determinar en el largo plazo (año 2000) cuáles serán *los factores* relevantes que incidirán en el desarrollo del Sistema de Transporte Terrestre.

ii) Hacer escenarios prospectivos sobre la demanda de transporte de mercancías y de personas, en relación con el Plan Nacional de Desarrollo Urbano.

iii) Elaborar escenarios normativos sobre la infraestructura deseada de la red de transporte terrestre en el año 2000.

iv) Hacer recomendaciones sobre políticas de desarrollo de las redes carretera y ferroviaria (evaluación de alternativas), de tal manera que se visualice una integración entre ambos modos.

---

[1] Dirección General de Análisis de Inversiones SAHOP

1.3 MARCO DE REFERENCIA

El establecimiento de un *marco de referencia* adecuado para el análisis de la *problemática* (y *problema*), debe tener en cuenta los objetivos de la investigación, así como la siguiente serie de *condicionantes, consideraciones* y *supuestos básicos*:

a) Condicionantes

i) El horizonte de planeación será el año 2000.

ii) Apegarse a los lineamiento del Plan Nacional de Desarrollo Urbano (PNDU).

iii) La preocupación fundamental es la *infraestructura* del sistema de transporte terrestre, lo cuál implica que no es necesario meterse de lleno al análisis del fenómeno transporte interurbano con lo cual se abrevia mucho el analisis.

iv) Se estudia el *transporte terrestre* (modos carretero y ferroviario) por considerarse realmente representativo del *fenómeno de transporte interurbano*, ya que es el que mueve aproximadamente, entre el 60% y el 75% del transporte interurbano de personas y mercancías.

v) Existe una Falta de coordinación y diversidad de intereses entre los tomadores de decisión de ambos modos de transporte (carretero y ferroviario). Y de hecho su planeación se hace en forma independiente.

i) Es importante considerar la *futura expansión del sistema de ductos* PEMEX, porque es clientela que se le va a ir en medida mayoritaria al ferrocarril, y a la vez va a aliviar el congestionamiento de algunas carreteras, donde PEMEX tiene un peso muy fuerte.

ii) Otro elemento que es importante analizar es un aspecto que actualmente esta descuidado y que en el futuro deberá tener un tratamiento muy distinto al actual es el *transporte de pasajeros por ferrocarril.*

iii) Otro aspecto importante a considerar es que a raíz del encarecimiento y escasez de productos derivados del petróleo, se podría dar una serie de políticas que *propiciarán* el transporte ferroviario sobre el carretero.

C) *SUPUESTOS BASICOS:*

Por otro lado, *parece razonable* que los *supuestos básicos* siguientes serán aceptables en un lapso de 20 años (HORIZONTES DE PLANEACION AÑO 2000).

i) No habrá cambios tecnológicos drásticos en el sistema de transporte terrestre (modos carretero y ferroviario).

ii) En los próximos 20 años el transporte terrestre seguirá siendo preponderante o mayoritario, tanto en personas como en carga, sobre los demás modos de transporte, (aéreo, marítimo, fluvial, etc.)

iii) Las decisiones que se tomarán, serán para satisfacer necesidades de transporte tanto de personas como de mercancías. Considerando la demanda de transporte a un nivel satisfactorio para la investigación, es decir, tomando en cuenta simplificaciones hechas y considerando muy maginalmente problemas de costos de operación, organización, etc.

iv) Se tomarán como válidas las tendencias expuestas en el PNDU, es decir, se presupone el cumplimiento de los objetivos del PNDU.

v) Que prácticamente los dos modos de transporte se han desarrollado independientemente y por lo tanto no se h dado suficiente importancia a su complementariedad o integración.

vi) Que la demanda de transporte y por ende la definición de alternativas infraestructurales para satisfacer esa demanda se basa en:

1. La interacción de las características de los nodos ponderados por la población y las actividades económicas.

2. La proyección de datos históricos de flujo de tráfico (de pasajeros y mercancías dividido en grandes rubros económicos) en los arcos.

3. La factibilidad técnica de la implantación de un modo de transporte a través de la topografía que atraviesa el arco.

vii) Que el PNDU en términos económicos y sociales es la expresión del modelo de país a que aspiramos (escenario deseado).

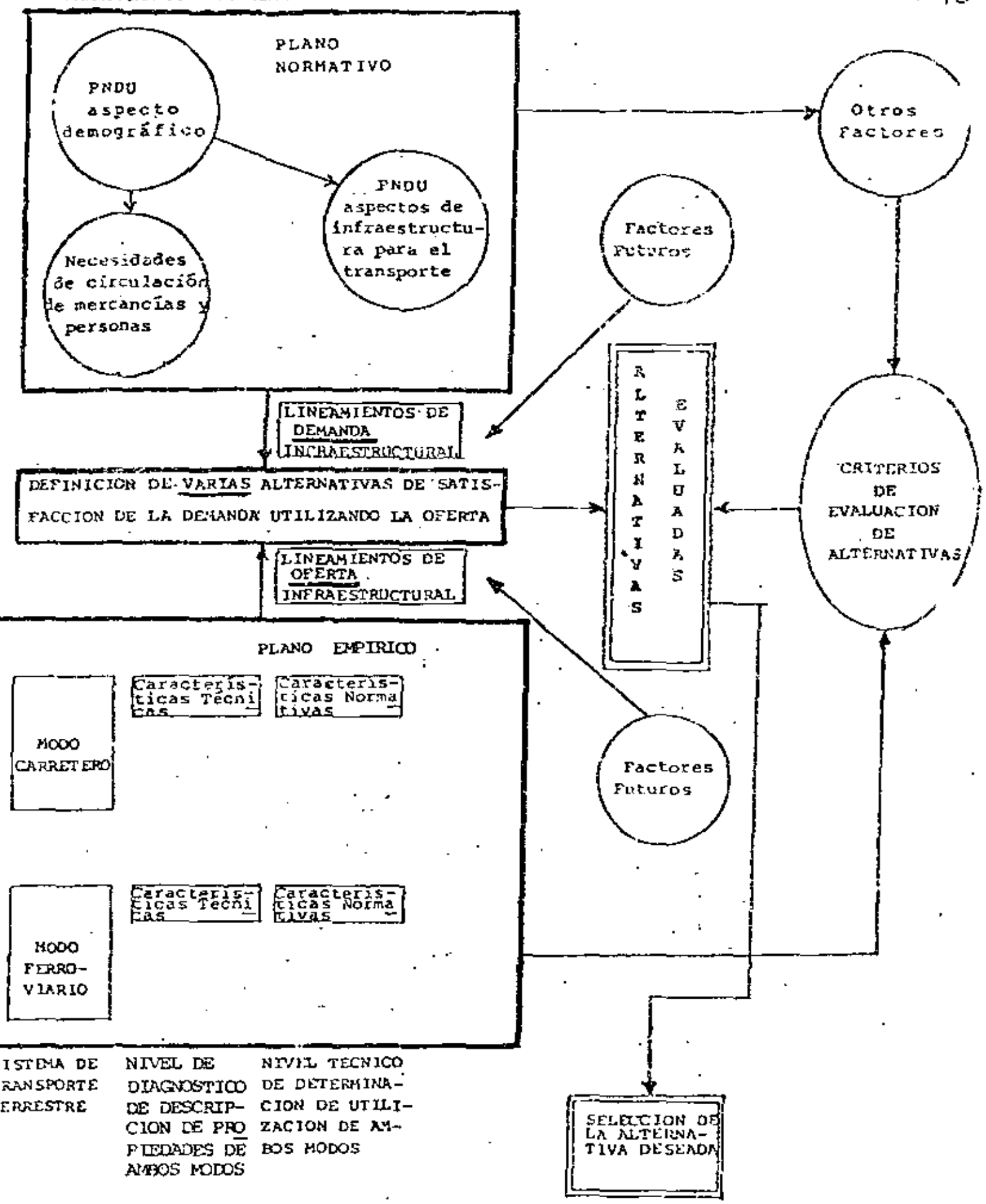
1.4 PARADIGMA DEL PROBLEMA.

Con base en la metodología empleada para el desarrollo del estudio la cual esta basada en ___ enfoque se determina el *paradigma del problema*.

Esquematización del paradigma del problema

La esquematización del paradigma del problema es la siguiente:

PARADIGMA DEL PROBLEMA



Plano Empírico

Dentro del plano empírico se tienen los modos carretero y ferroviario, ya que ambos modos tienen *características actuales* o *características reales* de su funcionamiento. Se obtendrá para ambos modos una descripción de cuales son sus propiedades.

A la vez ambos modos también tienen *características normativas* que implican el determinar para qué cosas sirve el ferrocarril y para qué cosas sirve la carretera y para cuáles no y en cuáles es compatible con el ferrocarril.

También es importante considerar los *factores que incidirán en el futuro desarrollo* de ambos modos de transporte.

Por otro lado, dentro de las *características reales*, el objetivo es el determinar como funcionan tanto el modo carretero como ferroviario, viéndose los problemas de operación, de manejo de patios, de la formación de trenes, de costos de operación, distancias medias de transporte, etc. Y dentro de las *características normativas* principalmente se determinará para qué sirve el ferrocarril y cuándo es conveniente usarlo, así como, cuándo es conveniente usar la carretera y por qué.

Dentro de los *factores que influirán en el desarrollo futuro*, se determinarán algunos de los aspectos más importantes a considerar en el futuro desarrollo de los modos de transporte carretero y ferroviario, por ejemplo, problemas sindicales, etc., para en un momento dado considerarlos.

PLANO NORMATIVO

Dentro del plano normativo se tiene el Plan Nacional de Desarrollo Urbano (PNDU) en dos de sus aspectos que están muy interrelacionados: el *demográfico* y el de la *infraestructura para el transporte* : Entonces, de las características del PNDU, en cuanto a su *aspecto demográfico* se deriva *cierta demanda* para la *circulación de mercancías* con el crecimiento del PIB Industrial) *y de personas*.

Por otro lado, se tiene que relacionado con el PNDU en sus aspectos demográficos está lo que *ellos* proponen en cuanto a *infraestructura de transporte*.

LINEAMIENTOS DE DEMANDA Y OFERTA INFRAESTRUCTURAL

De las necesidades de circulación de mercancías y personas y lo que está marcando normativamente el PNDU, en cuanto a la infraestructura para el transporte se obtiene lo que se denominará : *Lineamientos de demanda infraestructural.* Y de las características reales de los modos carretero y ferroviario y de aquello para qué sirven, así como de los factores que influirán en su futuro desarrollo nos dan *lineamientos de oferta infraestructural.*

DEFINICION DE ALTERNATIVAS DE SATISFACCION

Entonces, de la combinación de éstos lineamientos de *demanda* y de estos lineamientos de *oferta* , lo que va a salir es la *definición de alternativas de satisfacción.*

CRITERIOS DE EVALUACION DE ALTERNATIVAS

Del PNDU y de las características normativas (o sea, para lo que sirve el ferrocarril, para lo que sirve la carretera) así como, los factores que influirán en el desarrollo de ambos sistemas, se obtendrán criterios de evaluación alternativas.

EVALUACION DE ALTERNATIVAS

Estos criterios de *evaluación de alternativas* se van a aplicar a las alternativas de satisfacción y finalmente se va a tener como *producto final* algunas alternativas evaluadas.

SELECCION DE LA ALTERNATIVA DESEADA

Una vez hecho el punto anterior el patrocinador, posteriormente, determinará o seleccionará la alternativa deseada.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

SI EN EL AÑO 2000 LA CONFORMACION (ORDENACION) TERRITORIAL DE MEXICO, RESPONDE A LO QUE PRESCRIBE EL PLAN NACIONAL DE DESARROLLO URBANO ¿COMO DEBE SER? O ¿QUE PAPEL DEBE JUGAR EL SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE EN SUS MODALIDADES CARRETERA Y FERROVIARIA? DETERMINANDOSE EN ESTA VISION FUTURA ¿CUALES DEBERAN SER LAS REDES CARRETERA Y FERROVIARIA DE TAL MANERA QUE SE VISUALICE UNA INTEGRACION ENTRE AMBOS?

2. CONSULTA A EXPERTOS

2.1 ASPECTOS A TRATAR EN LA ENTREVISTA

2.2 DESCRIPCION DE LA TECNICA UTILIZADA

2.3 RESULTADOS OBTENIDOS

- INFRAESTRUCTURA CARRETERA Y FERROVIARIA EN EL AÑO 2000
- ALTERNATIVAS DEL DESARROLLO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE
- FACTORES QUE INCIDIRAN EN EL DESARROLLO FUTURO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE

2.4 CONCLUSIONES SOBRE LAS ENTREVISTAS Y LA REFLEXION PROSPECTIVA

2.1 ASPECTOS A TRATAR EN LA ENTREVISTA

- ¿Cuál será la posible infraestructura que se utilizará en el año 2000 en el sistema de transporte terrestre?

- Determinación de alternativas que se consideren fundamentales para alcanzar el desarrollo futuro del sistema de transporte terrestre.

- Identificación de factores o aspectos relevantes que en largo plazo incidirán en el desarrollo del sistema de transporte terrestre (modos carretero y ferroviario).

Cuestionario abierto.

2.2 DESCRIPCION DE LA TECNICA UTILIZADA

METODO KJ

En este anexo se explica con detalle la primera parte del método KJ, que consiste en una metódica para formular problemas.

Al aplicar el método KJ a esta investigación, se le hicieron modificaciones importantes, fundamentalmente en lo referente a las cuestiones de interconexión fenomenológica entre problemas.

Por otra parte, se consideró de suma importancia presentar en su forma original esta parte, dado que aún no existe bibliografía disponible en español sobre el tema.

I INTRODUCCION

El método KJ fué inventado y desarrollado por el doctor Jiro Kawakita, notable antropólogo japonés y profesor del Instituto Tecnológico de Tokio. El método se designa por sus iniciales: KJ

Originalmente fué un [illegible] heurístico para integrar un cuerpo de datos heterogéneos como los que se obtienen a través de la investigación antropológica. Al presente, el método se usa ampliamente como un enfoque científico al planteamiento y solución de problemas en campos como la educación, los negocios, la industria, etc. El propósito de este capítulo es destacar los componentes sociales del método en cuestión.

2 EL METODO KJ BASICO

Los cuatro pasos fundamentales en que consiste el método, se ilustran en el diagrama de la fig. 1

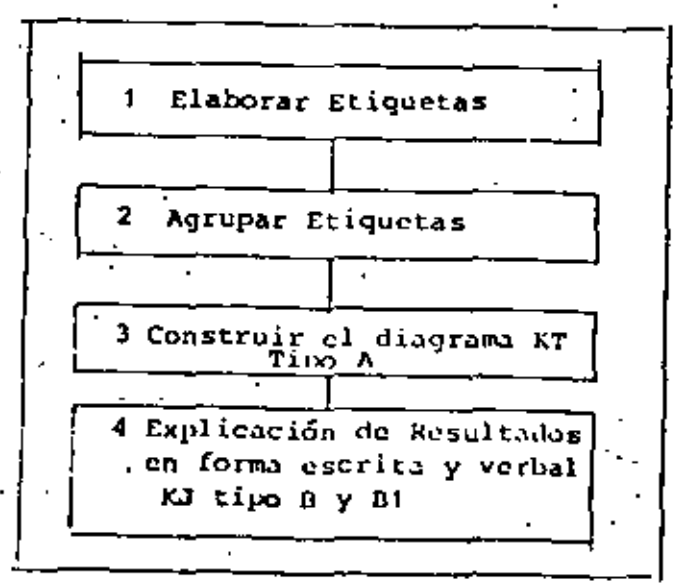
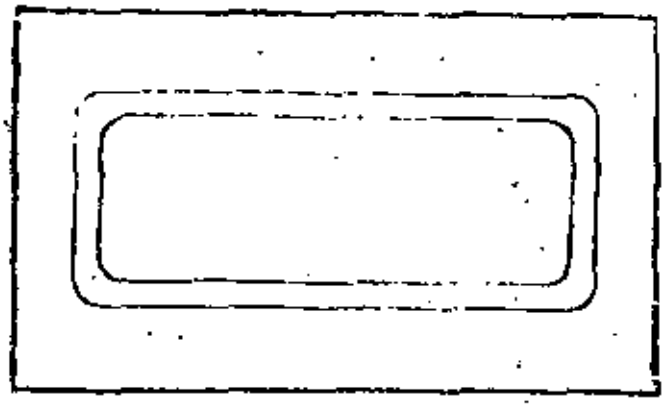


Fig. 1 Ciclo del método KJ

1. Ela boración de etiquetas.



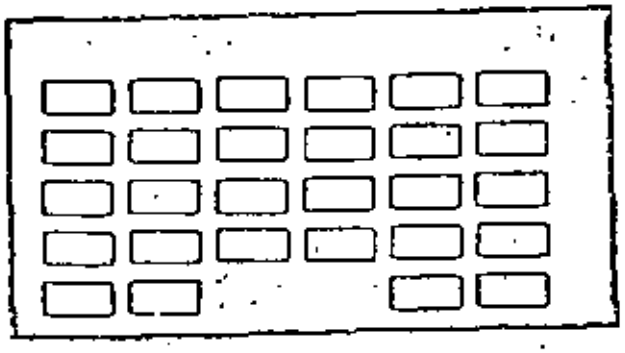
Se requiere una provisión de etiquetas o tarjetas de notas, que aún cuando pueden ser de cualquier tamaño, generalmente se usan rectangulares autoadhesivas (fig.
Primero se define el tema o problema a investigar.
Enseguida se acumulan ideas, pensamientos e información que sean o parezcan relevantes para el problema, y se anotan en las etiquetas. Es muy importante que en cada etiqueta aparezca sólo un concepto, idea o pensamiento, y debe expresarse con una oración o frase corta. No existe límite alguno en la cantidad de etiquetas que se elaboren, se acumulan hasta agotar la información y las ideas acerca del problema.

La información no debe seleccionarse nunca racional o lógicamente, sino incluirse todos los conceptos que vienen a la mente, aunque a primera vista parezca que están fuera de lugar o que no son agradables, ya que pueden estar relacionados con el tema y constituir información valiosa.

2. Agrupación de etiquetas.
El proceso de agrupar etiquetas se subdivide en tres pasos:

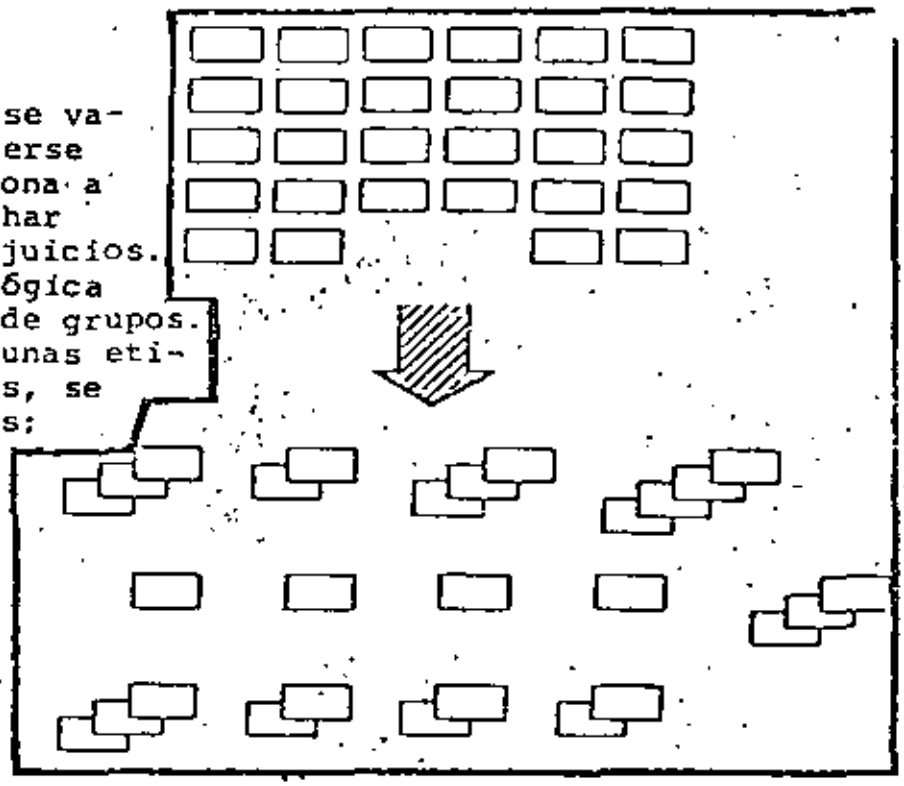
a) Extender las etiquetas

b) Formación de grupos



.1 Extender las etiquetas después de haber acumulado las etiquetas, se barajan y extienden sobre una superficie de manera que puedan observarse con facilidad (fig.)

.2 Formación de grupos.
Las etiquetas deben leerse varias veces. Puede suponerse que cada una es una persona a la cual se le debe escuchar cuidadosamente y sin prejuicios. El sentimiento y no la lógica debe guiar la formación de grupos. Cuando se siente que algunas etiquetas deben estar juntas, se forma un equipo con ellas; sin embargo, el número de etiquetas que forman un grupo debe limitarse a 2 ó 3 cuando más, y, en casos excepcionales cuando las etiquetas son mucho muy parecidas, puede formarse con cuatro. (fig.)



Conforme avanza el proceso de formación de grupos se notará que algunas etiquetas no tienen cabida en equipo alguno. Esto no debe ser motivo de preocupación, pues es muy posible que puedan agruparse posteriormente en algunos de los pasos siguientes. Esas etiquetas se conocen con el nombre de lobos solitarios, y, si bien no se debe forzar su agrupación, tampoco es correcto tener demasiados. Por experiencia, el número apropiado de lobos solitarios no debe exceder 10% del total de etiquetas acumuladas, e incluso pueden no presentarse.

Finalmente, los grupos de etiquetas deben asegurarse individualmente por medio de un clip.

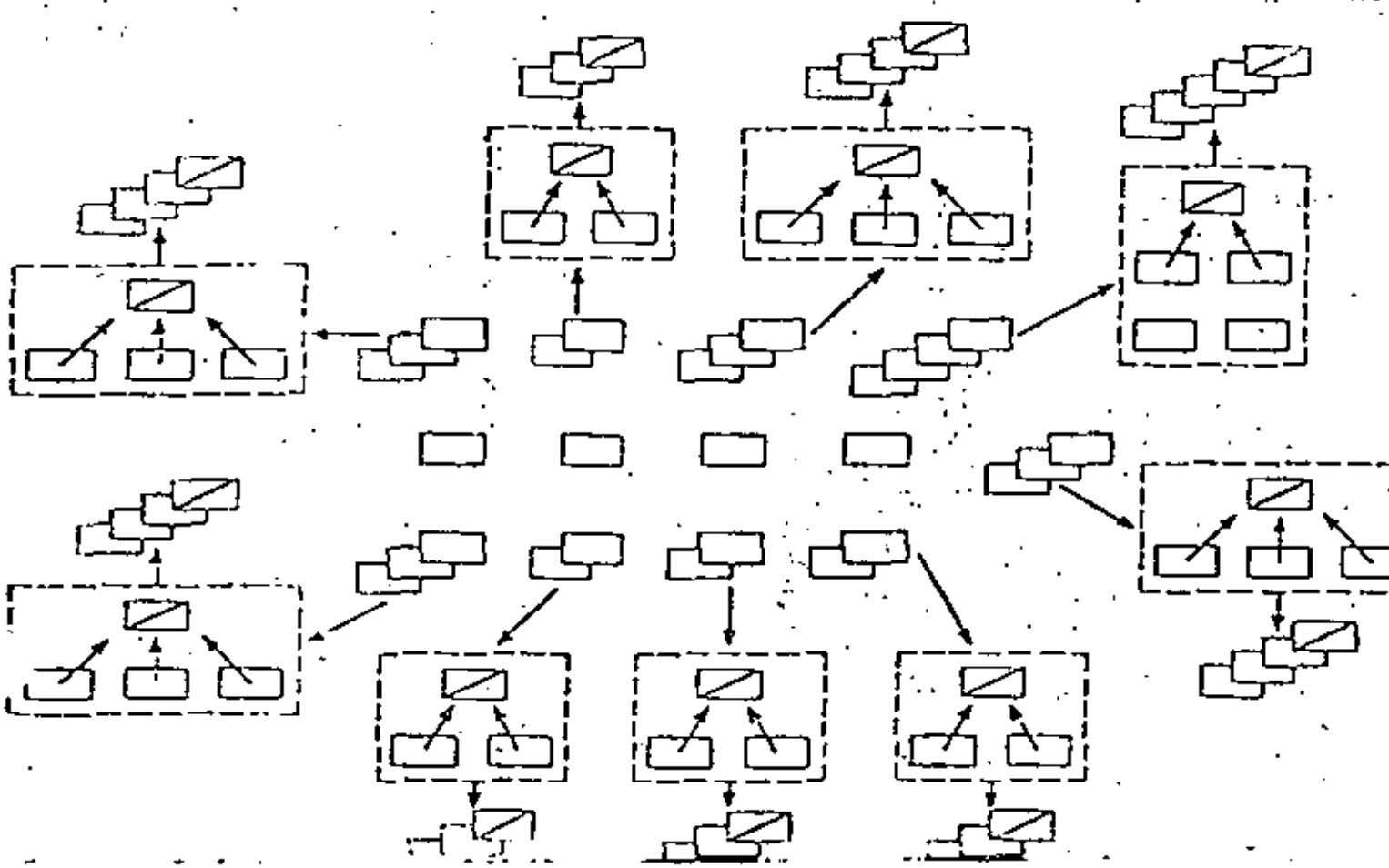
3. Nominación de cada grupo. Una vez formados los grupos de etiquetas, se procede a ponerle título a cada uno de ellos. Los lobos solitarios no participan en esta etapa, sino que se separan para uso posterior.

Los grupos se toman uno por uno, se retira el clip que asegura las etiquetas y se leen cuidadosamente. Debe comprenderse muy bien la esencia del contenido con el propósito de resumirlo en una oración o en una frase corta, lo cual constituirá el título del grupo. Este proceso es conocido con el nombre de Hyosatsu.

Una vez obtenido el título del grupo, las etiquetas del mismo que habían sido separadas para el Hyasatsu y el título se reúnen en un sólo grupo asegurado mediante un clip. El título debe aparecer en la parte superior del grupo de etiquetas.

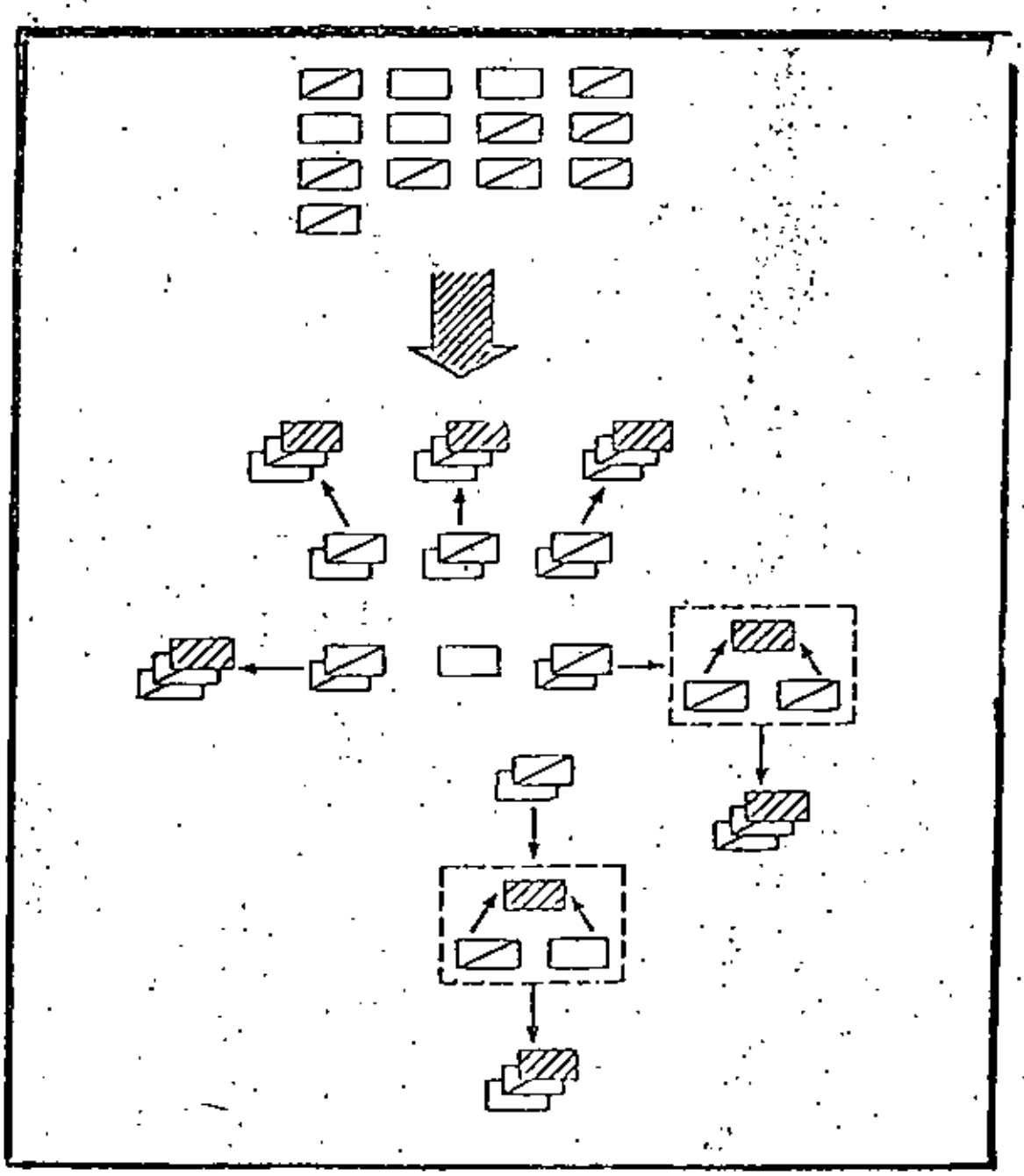
Es muy conveniente que las etiquetas que contienen títulos sean de color distinto al que tienen las etiquetas que se usaron inicialmente.

Si no se dispone de etiquetas de colores diferentes, puede usarse una marca para diferenciarlas (fig.

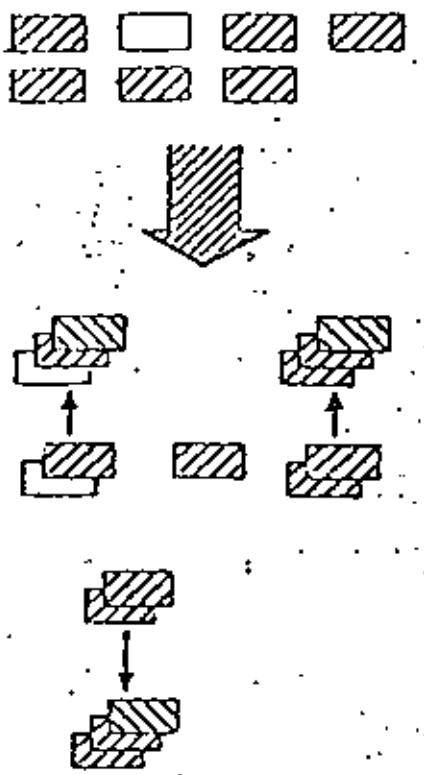


El proceso continúa hasta que todos los grupos tengan título. Al terminar se habrá realizado el primer paso de agrupación de etiquetas.

Ahora deberán extenderse sobre una mesa o el piso todos los grupos y los lobos solitarios. Deben leerse cuidadosamente los títulos y el contenido de los lobos solitarios, para iniciar otro paso del proceso de agrupación. Una vez terminada la agrupación se ponen títulos mediante el Hyosatsu (fig.)-



Es conveniente que estos títulos se escriban en etiquetas de color ó marca diferente al de aquellas que ya fueron rotuladas. Además, no se requiere que esas etiquetas sean autoadheribles.



La serie agrupación-hyosatsu se continúa hasta sentir que es imposible la reunión de los grupos disponibles para confeccionar nuevos títulos (fig.

Elaboración de un diagrama (KJ tipo A)

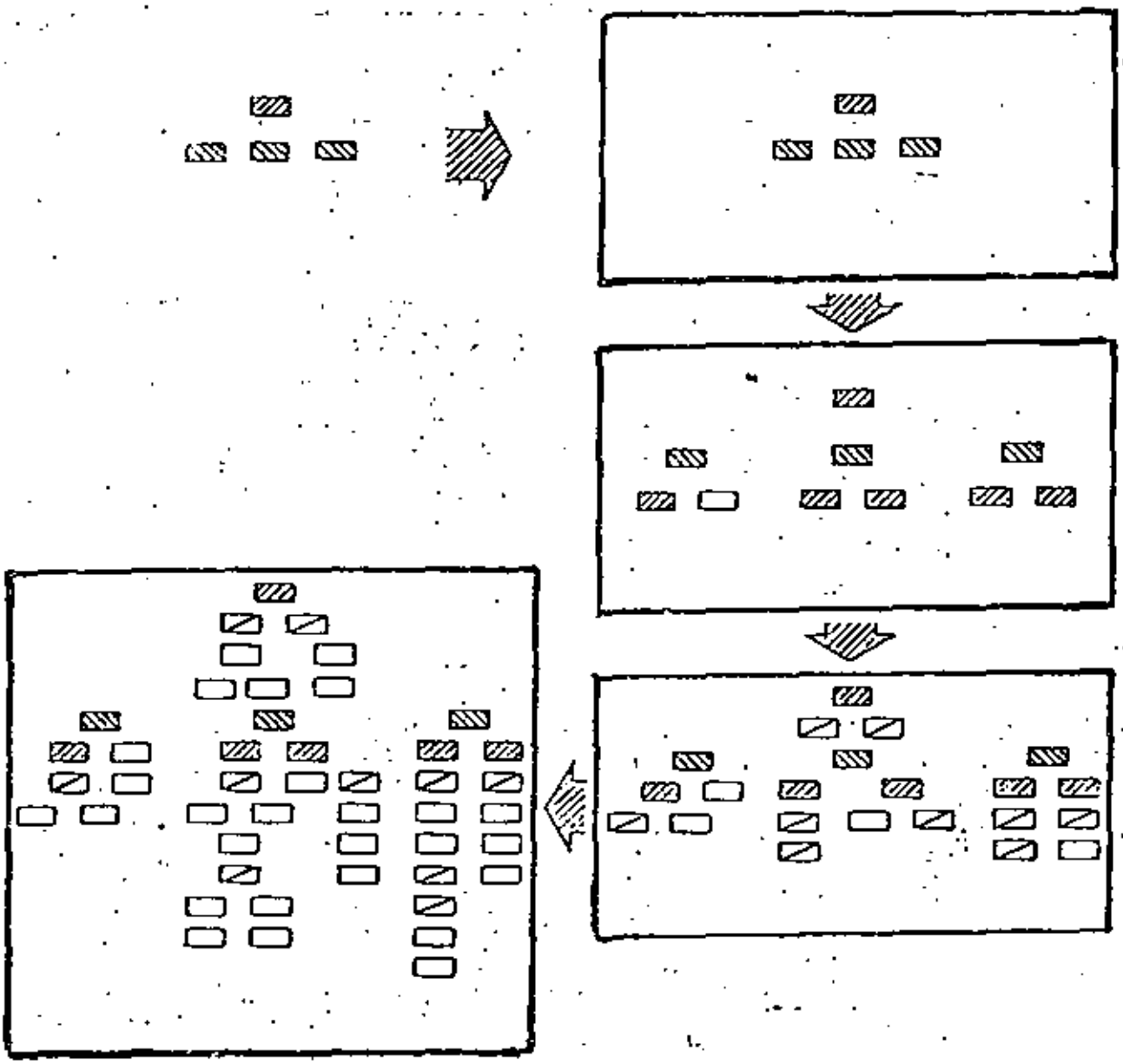
Debe realizarse con cuidado el arreglo que puede formarse con los grupos finales (menos de 10). El arreglo debe mostrar adecuadamente las relaciones que existen entre ellos.

Caundo la presentación del arreglo es satisfactoria, este debe colocarse sobre un pliego de papel cuyas dimensiones permitan alojar todas las etiquetas. Enseguida se retiran los clip que las sujetan, ordenándolas con base en las relaciones que guarden entre sí (fig.).

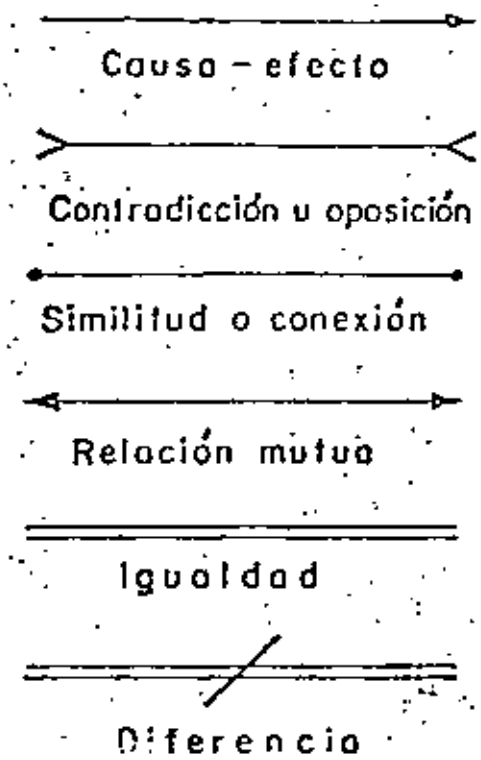
Las etiquetas de los grupos formados en el primer paso y sus títulos se pegan al papel. Cada grupo debe delimitarse mediante una línea. De este modo se inicia el dibujo del diagrama, que debe hacerse a mano.

Los rótulos restantes no deberín pegarse, sino sustituirse por letreros escritos a mano (representados por puntos en la fig. sobre la línea que demarca a cada grupo.)

Es importante dibujar las líneas de modo que puedan distinguirse con facilidad los diferentes grupos que integran el diagrama. Con este propósito deben hacerse de colores, de espesores diferentes o con características distintas.



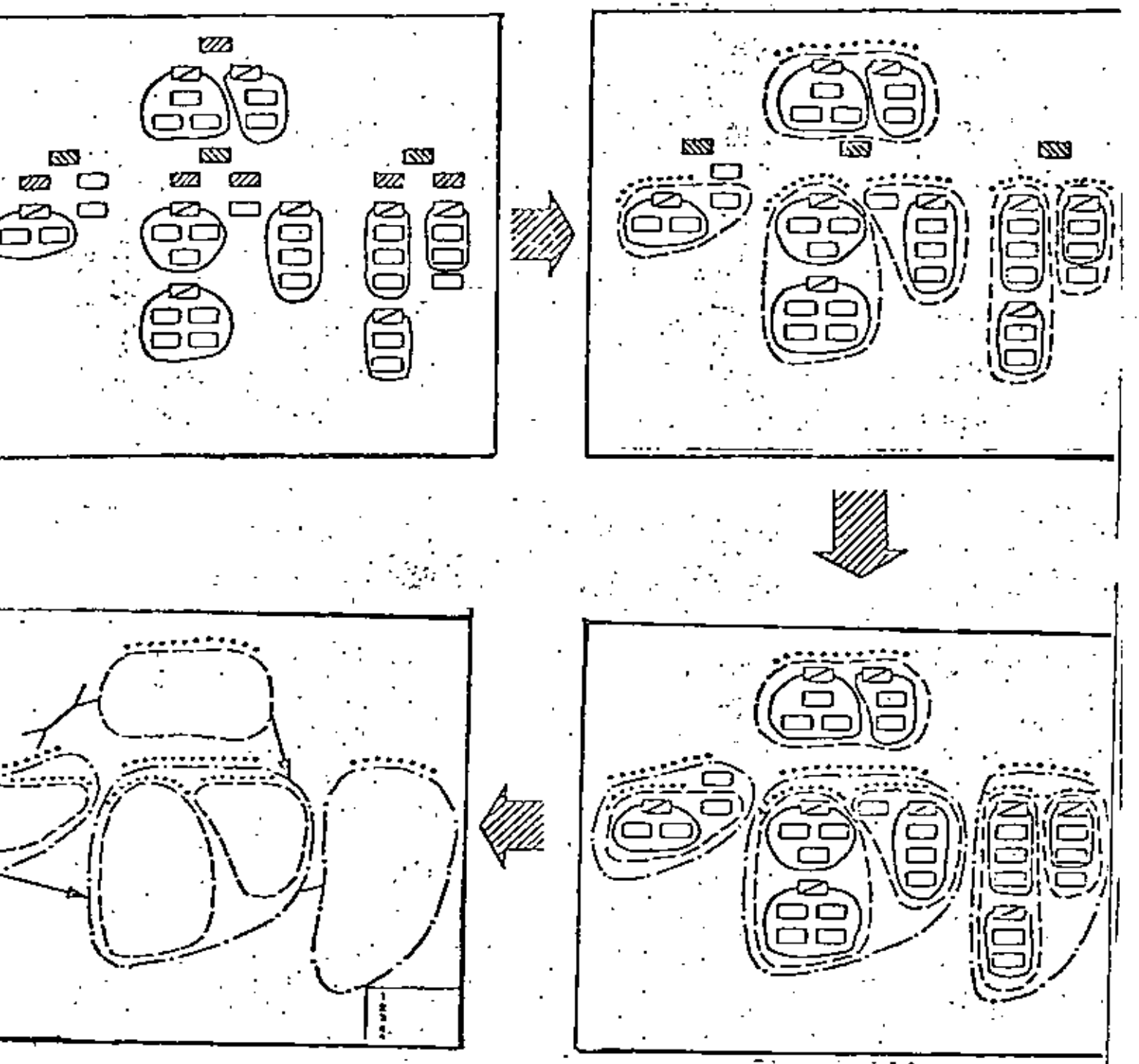
Para mostrar las relaciones que existen entre los grupos se hace uso de flechas y algunos otros símbolos, como los siguientes:



Enseguida se escriben cinco conceptos en el ángulo inferior del diagrama:

1. Fecha
2. Lugar
3. Fuente(s) de información
4. Nombre(s)
5. Tema o problema

Con lo cual queda terminado y será de gran utilidad para comprender la estructura del problema o tema que se investiga (fig.



1 19761229
2 UNAM, México, D.F.
3 Tormenta de cerebros en equipo
4 Sutano, Fulano, Mengano
5 ¿Qué es desarrollo?

Explicación de los resultados en forma verbal y escrita.

1. Explicación escrita (KJ tipo B)
   Con base en el diagrama se escribe la explicación del mismo; si surge alguna idea mientras se está escribiendo, también se incluye esta. Es conveniente anexar esquemas, mapas, estadísticas, etc.)

2. Explicación verbal (KJ tipo B1)
   El diagrama se pega en la pared, frente a la persona que vaya a hacer la explicación. Debe construir o explicar el escenario del problema tomando como base el diagrama y procurando emplear palabras diferentes a las escritas en él.
   La explicación debe ser clara y concisa.

2.3 RESULTADOS OBTENIDOS

El presente capítulo contiene una síntesis de las respuestas obtenidas en consultas a expertos. Estas fueron dirigidas de tal forma que se llegara a tener la información sobre los aspectos necesarios a considerar para lograr la implementación de los escenarios del estudio. Se presentan para cada una de las preguntas, comentarios y resultados.

¿Que tipo infraestructura carretera y ferroviaria habrá en el año 2000?

Comentarios:

Aunque los expertos entrevistados preveen cambios en los 2 modos de transporte, sus opiniones incidieron con más frecuencia en los cambios que esperan en el sistema ferroviario: de las 18 opiniones resultantes, 13 se refirieron al sistema ferroviario y solo 5 al carretero.

I. Infraestructura Ferroviaria.

Se preveen cambios drásticos en el sistema ferroviario basados, en la mayoría de las veces, en el palpable estado de retraso de éste y en la consecuente necesidad de modernizarlo. El desarrollo ferroviario se dará en términos, principalmente, de: aumentar su capacidad (nuevas líneas, vías dobles, ampliación de laderos), cambios tecnológicos, como incrementar la velocidad con vías rápidas electrificadas y locomotoras más rápidas, y automatización del control de tráfico con el sistema C.T.C.

1 - Habrá una mayor cantidad de vías dobles, así como de vías rápidas electrificadas.

a. Habrá vías electrificadas, pero solo a cierto nivel de tráfico.

b. En el año 2000 va haber mayor número de vías dobles y electrificadas, algunas de ellas serán : México-Irapuato-Guadalajara, México-San Luis Potosí, Córdoba-Rodríguez Clara, Monterrey-Querétaro, México-Veracruz.

c. En las zonas más pobladas de la repóblica, como los puntos comprendidos entre Villahermosa-Mazatlán y también entre Tampico y Acapulco habrá trenes rápidos (aproximadamente 100 Km/h).

d. Los trenes de pasajeros lograrán un aumento sustancial en la velocidad.

e. Es posible incrementar a doble o cuádruple vía ferrocarriles estratégicos como el interoceánico del Istmo.

2 - Construcción de nuevas líneas.

a. Se construirán nuevas líneas, por ejemplo: la vía corta a Tampico, la integración de la costera del Golfo.

3 - Mejoras en el sistema de control de tráfico.

tas de las casetas de carreteras convergentes a élla y los precios de transportes que vayan hacia la ciudad.

c. Apoyar la construcción de enlaces a zonas marginadas conectándolas con las de zonas ricas (subsidio cruzado).

d. Invertir infraestructura de transportes en función de beneficio social, donde los sectores más amplios resulten favorecidos.

e. Con los nuevos criterios de evaluación llegar a ciertas regiones claves con una infraestructura moderna y acorde con aumentar las tareas quitadas de subsidios.

f. Quitar los subsidios a ambos modos de transporte para ver cuál es más competente.

¿Cuales son los factores que incidirán en el desarrollo futuro del sistema de transporte terrestre?

Comentarios:

Al igual que en el caso de las alternativas, los expertos no tuvieron el alcance pedido en su visión, dan factores actuales, pero aún así, fué abundante la cantidad de factores sugeridos.

I. Factores Políticos.

a. Criterios de planeación en los 2 modos no solo en las entidades responsables (SAHOP y SCT) sino en los niveles decisorios de quienes autorizan y dan los fondos (SHOP y SPP).

b. La continuidad sexenal en materia de política de la infraestructura del transporte.

c. La presión pública para mejorar la eficiencia en los ambos modos.

d. Tipo de mentalidad en el liderazgo ferrocarrilero.

e. La integración de un sistema multinodal dependerá de las negociaciones del sector público con empresas privadas de auto transporte.

f. Visión de los planificadores a largo plazo.

g. La resistencia o facilidad que el sindicato de ferrocarriles ofrezca para modernizarlo.

h. Otro factor es que el Plan Nacional de Desarrollo Urbano viera alcanzado uno de sus objetivos de dar prioridad a ciertas zonas, de tal suerte de que esta pudiera llegar a disminuir la necesidad de intercambios tan largos lo que repercutiría en la red de infraestructura.

i. Problemas administrativos de cada modo que influyan en el apoyo gubernamental.

II. Factores Técnicos.

a. En distancias largas, mayores de 600 Kms, el ferrocarril es lo recomendable, mientras en distancias cortas el autotransporte, por los tiempos de carga y descarga, ofrece mayores posibilidades de eficiencia.

b. Si el centro de producción y el de consumo son cercanos, no se justifica el cambio de modo de transporte.

c. La especialización productiva de una región en términos de la densidad económica del producto difiriera la selección del modo de transporte.

d. El volumen de carga y/o de pasajeros determinará el modo de transporte.

e. El factor más importante será la capacidad misma que tengan los ferrocarriles para satisfacer la demanda.

III. Factores Tecnológicos.

a. La evolución en las dimensiones de los autotransportes que propiciarán cambio de condiciones a las carreteras.

b. La aplicación de técnicas de operación (ingeniería de sistemas), con el uso de las telecomunicaciones y el

procesamiento de datos dará una posición ventajosa al ferrocarril por ser éste un sistema integrado.

c. El desarrollo en materia de fabricación de locomotoras y equipo ferroviario en general, será un factor importante en el desarrollo del ferrocarril.

d. El uso de continadores y piggy-backs integrará el sistema de transporte terrestre.

IV Energéticos.

a. El consumo de energéticos escasos.

b. La posibilidad del ferrocarril de usar energía eléctrica lo coloca en una posición ventajosa.

c. El posible aprovechamiento de recursos renovables y no-renovables demandará mayor transporte.

d. La disponibilidad y precio de los energéticos será determinante en la selección del modo de terrestre.

e. Utilización de menos energéticos.

V Factores de Operación.

a. Visualización de los volumenes de carga a manejar.

b. Tipo de producto (perecedero ó no) a transportarse.

c. Posible organización intermodal.

d. El costo, la rapidez, y la confianza que se pueda te-

ner de si transporten los productos con éxito influyan en la decisión de modo de transporte.

e. Puntualidad en los servicios de cada modo.

f. Frecuente renovación y capacitación de personal para tener un nuevo sistema ferroviario.

VI Factor Legal.

a. El responsabilizar a una sola persona (transportista) que a todo un sistema ferroviario, da la seguridad de su carga, influye las decisiones de los usuarios.

VII Factor Demográfico.

a. La evolución de los asentamientos humanos.

b. El desarrollo real de los centros de población visualizados en el Plan Nacional de Desarrollo Urbano.

c. La concentración demográfica de la ciudad de México.

VIII Factores Geográficos Económicos.

a. El rompimiento del centralismo.

b. Una mayor dispersión territorial con pequeñas localidades autosuficientes minimizará el transporte.

c. La descentralización industrial afectará el transporte: por ejemplo, al ubicar la industria, prácticamente la pesada, en la zona donde encuentra mayor facilidad de insumos y consumos solo se requerirá transporte de distribución final.

d. La topografía de la región influye en los costos de construcción de ferrocarril o carretera.

e. La localización de puertos y el comercio fronterizo.

f. La necesidad de infraestructura de apoyo a puertos industriales.

IX. Factores Financieros.

a. Un factor importante es la distribución de la inversión pública; de acierto a prioridades políticas.

b. El condicionamiento de la finanza externa.

c. Las exigencias que el gobierno imponga a cada sector de transportes para invertir.

X. Factores Económicos.

a. Posibilidades técnicas-económicas.

b. La evolución de la producción.

c. El movimiento aduanal.

d. La distribución del ingreso puede lograr que un extrac-

a. Para aumentar la capacidad de circulación en una vía sencilla se ampliarán los laderos, para correr trenes más largos, mejorando el C.T.C.

b. Para el año 2000 habrá un gran número de vías de tráfico centralizado.

II. Infraestructura carretera.

En cuanto al desarrollo carretero, la opinión general, es que este se dará en forma de : un mayor número de autopistas y rutas alternas, así como cambios incrementales en algunas carreteras de la red actual. Un aspecto importante es que se requerirá, debido a la magnitud de la futura red carretera, un gran sistema de mantenimiento.

1.- Se construirán autopistas y habrá ampliaciones a carreteras actuales.

a. Va a haber un gran desarrollo de caminos de calificaciones muy altas, tales como autopistas.

b. En el futuro se seguirán haciendo preferentemente autopistas en su mayoría convergentes a la Ciudad de México y entre ciudades del Noroeste.

c. Se construirán más brechas, para difundir la red a su nivel más bajo.

d. Habrá autopistas de 6 ó hasta de 8 carriles, de mayor número serán incosteables.

e. Cuando no sea posible ampliar la capacidad de las carreteras se explotarán rutas alternas.

f. Se darán cambios incrementales, por ejemplo agregar 2 carriles a la carretera México-Monterrey y lo mismo para la de Guadalajara-Nogales.

g. Continuará la tendencia a transportar más pasajeros por carretera.

2 - Por la gran cantidad de carreteras, habrá un gran sistema de mantenimiento.

En la zona industrial de Lázaro Cárdenas, la carretera tendrá que sufrir modificaciones para el transporte del acero.

Alternativas para el desarrollo del sistema terrestre de transporte.

Introducción :

La pregunta planteada fue:

¿Cuales deben ser las alternativas para el desarrollo del transporte terrestre en el año 2000 (modos carretero y ferroviario) ?.

Comentarios :

Es importante observar que las respuestas de algunos entre-

vistados carecían de visión prospectiva, esto es, daban alternativas a corto plazo, o para resolver problemas actuales. Incluso, en algunos casos, la respuesta que daban (un tanto a la defensiva) era lo que ellos estaban haciendo. Hubo también, tanto respuestas interesantes y completas, como respuestas simples.

Otro aspecto interesante, es que muchos hablaron de modernizar el ferrocarril y desarrollar un sistema integral y complementario de los 2 modos, pero muy pocos indicaron como. Sin embargo, es relevante el hecho de que la gran mayoría dió alternativas preferentemente sobre el ferrocarril, aunque también hubo opiniones de que debe seguir desarrollándose el sistema carretero. Hubo también alternativas en torno a aspectos políticos, técnicos y de operación.

I. Integración y Complementaridad entre los 2 modos.

1 - Selección del modo de transporte con base a la carga.

a. Uso del ferrocarril cuando se trate de volúmenes masivos de carga de baja densidad económica a ciertas distancias mayores, y por carretera cuando se trate de productos de alta densidad económica que se muevan a distancias cortas y con un régimen de movimiento más activo.

b. En aquellas areas con mayor flujo de mercancía pesada, se utilizarán vías férreas con conexión de otros medios de transporte, habrá acceso a carreteras para traileros tipo "container" para las lineas troncales de ferrocarril.

c. Transporte carretero para aquellos productos de alto costo económico y distancias menores a 400 Kms, mientras el transporte ferroviario para grandes volúmenes de carga de baja densidad económica.

d. Aprovechar los "caminos" de carreteras viejas en superficies planas, para construir vías de ferrocarril.

2 -. Uso de Procedimientos Multinodales.

a. El uso de containers permitirá la interfase entre los 2 modos complementándolos y haciendo más fluido el manejo de la carga.

b. Se deberán desarrollar empresas filiales al ferrocarril que se encarguen de la operación de la carga con el uso de contenidores y piggy-back.

c. En Manzanillo debería hacer un sistema multinodal porque es el punto central de mejor viabilidad para otra terminal de contenedores.

3 - Cambios de Orden Político.

a. Se deberá decretar la unión de los 2 modos terrestres para poder trabajar en forma compartida.

b. El gobierno no debe actuar en favor del sistema carretero, dándole demasiado presupuesto para construcción, debe haber un manejo honesto del presupuesto para cada modo sin preferencias.

c. Es necesario que el mecanismo de Planeación y Ejecución de Obras entre la S.C.T. y SAHOP se fortalezca y se construya solo aquella infraestructura indispensable.

II. Desarrollo Ferroviario.

1 - Apoyar el desarrollo del ferrocarril.

a. Promover el uso del ferrocarril cuando el tráfico sea idóneo.

b. Impulso al transporte masivo de pasajeros por ferrocarril.

c. Impulso al ferrocarril por medio del uso de piggy-backs y containers en corredores, por ejemplo el de Coatzacoalcos-Salina Cruz.

d. Que exista voluntad de cambio en la toma de desiciones del sector ferrocarrilero.

e. Dar prioridad al ferrocarril tomando como base la problemática de los energéticos en el mercado y la presión externa derivada.

f. Fortalecer las inversiones en el sistema ferroviario durante varios sexenios.

g. Una política general debe ser liquidar el pasado obsoleto, dando a ferrocarriles 2 ó 3 veces lo que le dá.

h. El ferrocarril deberá tener mayor participación como en otros países.

i. Tomar en cuenta la cuestión tarifaria, para dar impulso al transporte ferroviario.

2 - Mejoramiento Infraestructura ferroviaria.

a. Rehabilitar todos aquellos tramos que sean de tráfico intenso.

b. Actualizar las vías para que sean rentables.

c. Programar una rápida reconstrucción y rectificación de los trazados de las vías con una programación de inversiones distribuidas a nivel nacional.

d. Aumentar capacidad de las vías en el centro.

e. Se necesitan nuevos planes de rehabilitación de las líneas que se construyeron y que no tienen

capacidad operativa ni para la potencia de las locomotoras, ni para el mayor peso por eje de ferrocarril.

3 - Uso de Ferrocarril para Grandes Distancias.

a. El transporte idóneo deberá ser el ferrocarril, por las distancias tan largas que hay en México.

b. Uso de ferrocarriles interurbanos por tener mayor capacidad de carga, ya que al haber mayor separación entre paradas aumenta la velocidad promedio y el número potencial de viajes.

4 - Trenes Veloces, Electrificaciones y Vías Dobles.

a. Tren super rápido en la zona del bajío.

b. Trenes interurbanos electrificados que conecten por ejemplo, la Ciudad de México con otras importantes; Toluca, Puebla, Pachuca, Cuernavaca.

c. Trenes suburbanos de transportación masiva.

d. Construir vías dobles electrificadas.

III. Desarrollo Carretero.

1 - Apoyo al desarrollo carretero con base a su preferencia por parte de los usuarios.

2 - Solución al centralismo y ordenamiento de territorio.

a. Crear sistemas perpendiculares al actual, para tener mejor comunicación interna, con carreteras que surgen del Golfo al Pacífico o de la frontera al Pacífico y evitar construir carreteras perpendiculares a la ciudad de México.

b. Romper el centralismo de la ciudad de México, conectando por ejemplo Coatzacoalcos con Guadalajara o Coatzacoalcos con Tampico, sin pasar por la ciudad de México.

c. Construir carreteras de libramiento a la ciudad de México, específicamente, serán:

1. Querétaro-Pachuca-Puebla (periferia) - Sistema Sureste.

2. Querétaro-Edo. de México (Valle de Bravo, Ixtapan de la Sal) -Cuautla-Jojutla-Matamoros-Tehuacán- Sistema del Itsmo.

3 - Innovación Técnica.

a. Construcción de vías dobles de 2 ó 3 carriles a los centros productivos.

b. Adaptación de carreteras y puentes para usar contenedores de 10 pies y 130 toneladas.

c. Llegarán a existir convoyes y camiones tractor a los que se les pueda enganchar "trenes" de camiones.

d. Promover la búsqueda de nuevos energéticos.

IV. Aspectos de Operación

1 - Ferrocarriles.

a. Homogeneizar horarios de cargas y transporte.

b. Modificar itinerarios de tal forma que en los momentos que no existan picos de demanda de transporte de pasajeros, se hagan corridas de transporte de carga.

2 - Ambos Modos.

a. Hacer vehículos standares tanto ferrocarriles como auto transporte.

b. Evitar rompimiento de carga con uso de contenedores.

c. Construir centros de almacenaje intermedios y de interfase.

3 - Otros.

a. Transporte de paquetes por tubería.

4 - Estudios de tipo y cantidad de carga.

a. Clasificar los tipos de carga para cuando van del mismo tipo, determinada cantidad y vayan a determinadas distancias, transportarlos en trenes unitarios, por ejemplo, madera, minerales, metales, etc.

b. Jerarquizar y homogeneizar los estandares de vehículos de cargas para saber por ejemplo cuando no es posible pasar por un puente.

V. Medidas de Orden Político-Económico.

1 - Políticas de precios y tarifas.

a. Establecer una política en materia de tarifas, que pudiera hacer más compatibles los dos modos con base a un estudio económico de los transportes que determine cuáles son los medios o modos de transporte más apropiados para determinadas distancias.

b. Descentralizar la ciudad de México elevando: cuo-

to de la población que no tiene acceso al automovil, lo tenga en el futuro, con la consecuente preponderancia del sistema carretero.

e. La explosión que tenga el uso del automovil.

f. Desarrollo económico.

XI Factor Social.

a. La imitación del patrón de vida americano (tener auto propio).

XII Factor Desarrollo de otros Modos de Transporte.

a. El desarrollo de aeropuertos puede influir en cierta clase de pasaje. Actualmente Mexicana transporta a Monterrey más pasajeros que el tren.

b. El desarrollo de la red de ductos de PEMEX reducirá la carga de petróleo que se hace por ferrocarril.

SINTESIS

De todos los factores dados, se seleccionaron los siguientes como los más importantes para el estudio:

1. Continuidad en materia de política de infraestructura del transporte, con base a los objetivos trazados en el PNDU (factor político).

2. Las distancias y el volumen de carga (factor técnico).
3. Uso de containers y piggy-backs (factor tecnológico).
4. Disponibilidad y precio de energéticos (factor energético).
5. El ordenamiento de territorio visualizado por el P.N.D.U. (factor geográfico).
6. La evolución de la producción (factor económico).
7. El apoyo financiero y subsidiario, que se dé a cada modo de transporte.
8. El desarrollo de otros modos de transporte.

Aunque esta lista puede variar según criterios, se cree que son los más relevantes para hacer una selección de que factores pueden tener influencia en el sistema de transporte terrestre.

En el siguiente capítulo los factores político, técnico y geográfico seleccionados, se considerarán en forma directa y el económico y el de desarrollo de otros modos de transporte en forma indirecta. Los otros factores son recomendables para que se realizen investigaciones serias por parte de los involucrados en política del transporte.

CONCLUSIONES SOBRE LAS ENTREVISTAS Y LA REFLEXION PROSPECTIVA.

Entre las conclusiones de este trabajo, debemos anotar que debido al método exploratorio que se siguió y la restriccion de apegarse al P.N.D.U. hubo pocos elementos no-tendenciales para la construcción de escenarios futuros para el sistema de transporte terrestre.

Nos parece, sin embargo, señalar algunos de esos puntos que merecen sin lugar a dudas un estudio de profundidad, es decir la construcción de escenarios, entendidas como imágenes futuras plausibles, coherentes y completas. O sea, imágenes de las cuales esté ausente la contradicción, cuya factibilidad esté descrita en términos de "gérmenes" que podemos observar en la actualidad y que tienen un potencial de desarrollarse en el futuro; además estas imágenes son construidas alrededor de un hilo conductor o hipótesis fundamental, donde el conjunto de elementos relevantes estén incluídos y aparezcan como una consecuencia coherente con la hipótesis. Es decir, estas hipótesis son llevadas "hasta sus últimas consecuencias". Además del interés pedagógico; los escenarios tiene el interés de explorar alternativas a veces de cambio radicales y que en consecuencia demuestren opciones cualitativamente superiores, y no solo como en el presente estudio cuantitativamente mejores. He aquí algunas de esas posibles ideas fuerza:

¿Qué pasaría si se quitaran los subsidios al ferrocarril?, ¿Qué pasaría si se quitara el subsidio a la gasolina y al diesel, es decir, que se cotizaran a precios internacionales?

¿Qué pasaría si la construcción de carreteras tuviera como principio el autofinanciamiento por los usuarios mismos?, ¿Cuáles serían las tarifas?, ¿Qué redes se desarrollarían más?

¿Qué pasaría si el transporte fuera uno de los ejes fundamentales para la política de descentralización, es decir, a través de una política diferencial de tarifas, cuotas de carretera, construcción de vías alternativas para no obligar a pasar por el centro, se facilitará la instalación industrial y comercial en otras zonas?

¿Qué pasaría si el gobierno decide nacionalizar los autotransportes, para dar preferencia a zonas marginadas?

¿Qué pasaría si se decidiera la privatización de los ferrocarriles, como en Alemania? ¿Habría libre concurrencia?

¿Qué pasaría si se decidiera ahorrar ciertos energéticos, como la gasolina, que otras alternativas habría?

¿Qué pasaría si se decidiera hacer una racionalización, es decir, evitar la competencia tren-carretera, por ejemplo seleccionando necesariamente el tren para largas distancias?

¿Cómo se podría hacer una estandarización en el transporte de mercancías, y también en el de pasajeros, por ejemplo coordinando itinerarios y horarios?

¿De qué manera se podría pensar en un sistema de transporte que tuviera la tendencia contraria a la actual, es decir, de servicio interno y pensar en un sistema para la expansión tanto para el norte como para el sur y también comunicando y dando prioridad a los puertos?

¿Qué otras alternativas habría ante la inovación tecnológica? (por ejemplo uso de "hovercrafts" en tierra, trenes de cremallera en las montañas, en el uso de el funicular o teleférico, comunicación por tubos).

¿Qué pasaría si la comunicación de informaciones evita el desplazamiento de personas, ó al menos lo reduce? (esta posibilidad ciertamento no es lejana)

No quisiéramos concluir esta lista de ideas, ni tampoco aparecer como soñadores; insistimos todas estas ideas necesitan profundizarse, meterse en el contexto específico del pais, evaluarlas, tecnicamente y en función de costos, viendo las consecuencias sociales, etc. Finalmente habrá que recordar que el futuro es la mezcla de las tendencias y de las decisiones humanas y México puede cambiar radicalmente, tomando alguna de estas opciones.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

ALGUNOS CONCEPTOS DE SIMULACION

DR. MARCIAL PORTILLA ROBERTSON

NOVIEMBRE, 1980

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

ALGUNOS CONCEPTOS DE SIMULACION.

POR MARCIAL PORTILLA R.

PARA PODER ANALIZAR CUALQUIER SISTEMA, ES NECESARIO PRIMERAMENTE EL MODELADO. DEL ESTABLECIMIENTO ADECUADO, DEL MODELO DEPENDERA EN GRAN PARTE EL EXITO DEL ESTUDIO, UNA VEZ LLEVADO A CABO EL MODELO DEL SISTEMA SE PROCEDERA A SIMULARLO USUALMENTE A DIFERENTES CONDICIONES EXTERIORES (VARIABLES EXOGONAS DEL MODELO).

EN ESTE CAPITULO DEL CURSO VAMOS A VER PRIMERAMENTE, LA DEFINICION DEL MODELO, SU CLASIFICACION SEGUN SUS CARACTERISTICAS Y SEGUN SUS FUNCIONES, VEREMOS COMO FORMULAR UN MODELO (DEL TIPO QUE PODAMOS SIMULAR), ASI COMO SU DESARROLLO. POSTERIORMENTE VEREMOS LA METODOLOGIA DE LA SIMULACION, LA GENERACION DE NUMEROS ALEATORIOS, LA GENERACION DE FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD, CON LOS CONCEPTOS ANTERIORES SE ANALIZARA UN PROBLEMA UTILIZANDO EL METODO DE MONTECARLO EN LINEAS DE ESPERA Y POR ULTIMO SE VETA LENGUAJES DE SIMULACION: DYNAMO, ASI COMO PROBLEMAS TIPICOS QUE SE PUEDEN RESOLVER CON ESTE LENGUAJE DE SIMULACION.

1.- DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES.

VAMOS A DEFINIR UN SISTEMA COMO UN AGREGADO DE OBJETOS O ACCIONES LOS CUALES TIENEN UNA INTERACCION REGULAR INTERINDEPENDIENTE. (1)

AL ESTABLECER EL MODELO DE UN SISTEMA EL ANALISTA DEBE DETERMINAR LAS FRONTERAS DEL MISMO, DEBEMOS NOTAR QUE NINGUN SISTEMA ESTA TOTALMENTE AISLADO, SIN EMBARGO PARA FINES ESTUDIO LOS SISTEMAS DEMASIADO GRANDES SE TORNAN EN IMPOSIBLES DE ANALIZAR O MUY COSTOSOS.

A LOS CAMBIOS QUE OCURREN AFUERA AL DEL SISTEMA Y QUE AFECTAN SENSIBLEMENTE AL SISTEMA EN ESTUDIO DECIMOS QUE OCURREN EN EL "MEDIO AMBIENTE" DEL SISTEMA, Y COMO SE DIJO ES IMPORTANTE FIJAR LAS FRONTERAS DE ESTE MEDIO AMBIENTE EN LA ETAPA DE MODELADO DEL SISTEMA.

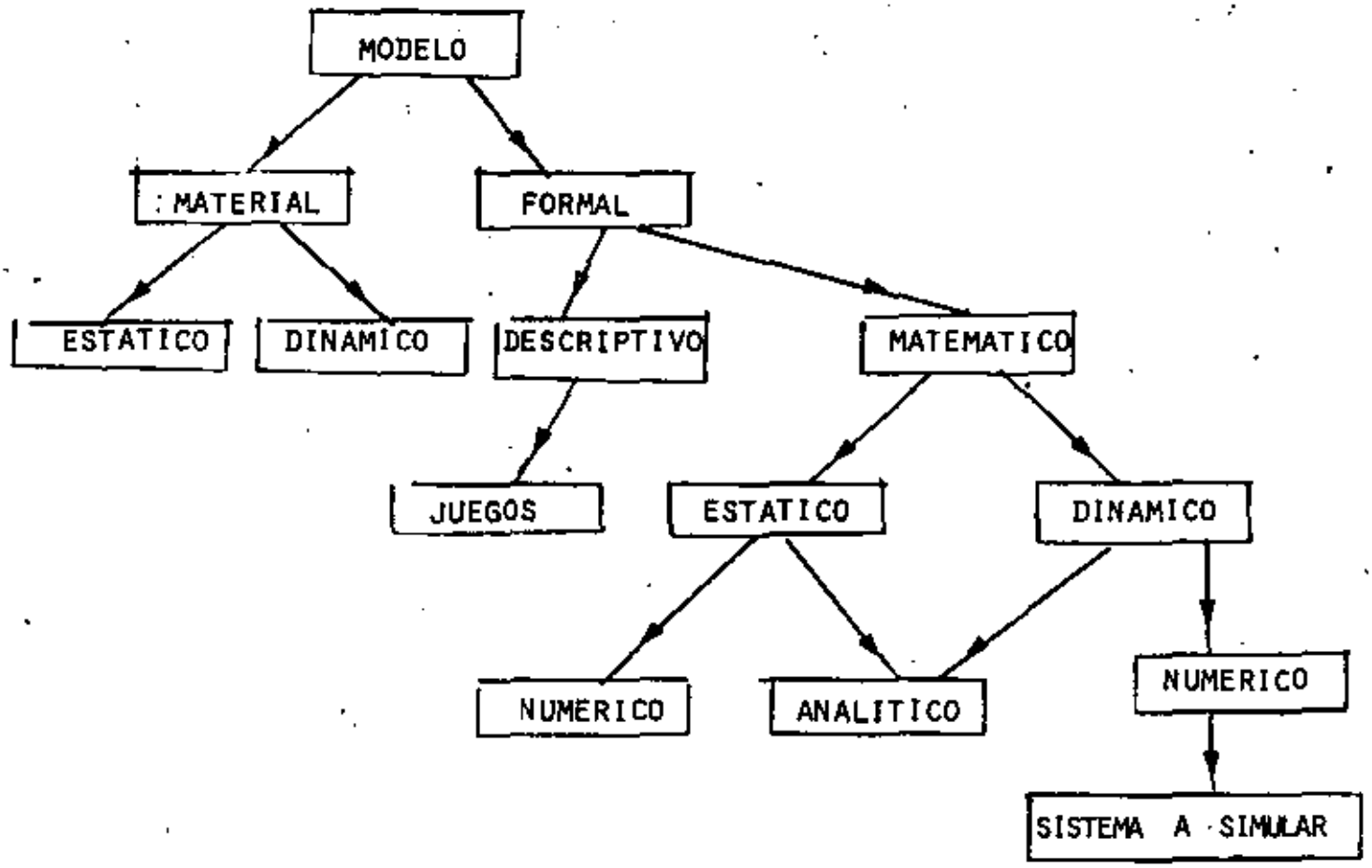
VAMOS A DEFINIR COMO UN "MODELO" LA REPRESENTACION CUALITATIVA Y/O CUANTITATIVA DE UN SISTEMA. ESTA REPRESENTACION DEBE MOSTRAR LAS RELACIONES ENTRE LOS DIVERSOS FACTORES QUE SON DE INTERES PARA EL ANALISIS DEL SISTEMA.(2) ES MUY IMPORTANTE, CON EL OBJETO DE QUE EL MODELO SE PUEDA MANEJAR, EL SOLO INCLUIR LAS VARIABLES MAS RELEVANTES EN EL CASO DE ESTUDIO, TAL VEZ NOS PREGUNTEMOS EN ESTE PUNTO EL POR QUE HAY QUE MODELAR UN SISTEMA PARA DESPUES SIMULARLO? BIEN, SI SE QUIERE ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION TAL VES, RESULTE "COSTOSO" HACERLO EN EL SISTEMA EN LUGAR DE EN EL MODELO, EJEMPLO DE ESTO SON DECISIONES ECONOMICAS O (POLITICAS) QUE SE TOMAN EN UN PAIS SIN ENTENDER SU EFECTO DENTRO DEL SISTEMA. EXISTEN TAMBIEN RAZONES DE SEGURIDAD. POR EJEMPLO SI SE DESEA INVESTIGAR LOS EFECTOS DE CARGAS EN VIGAS PARA EDIFICIOS O PUENTES, RESULTA MUY PELIGROSO LLEVARLO A CABO EN EL EDIFICIO O PUENTE EN LUGAR DE UN ALGUN MODELO.

POR ULTIMO SI UTILIZAMOS MODELOS, PODEMOS PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DEL MISMO A DIFERENTES CONDICIONES Y/O CAMBIOS QUE SE DEN EN SU MEDIO AMBIENTE. TAMBIEN SE EMPLEAN MODELOS EN EL DISEÑO DE PROTOTIPOS (I E, AVIONES, SISTEMAS ECONOMICOS) PARA ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO DEL MISMO CON DIFERENTES CONDICIONES, Y ASI PODER EVALUAR LOS DIFERENTES PROTOTIPOS LLEVADO A CABO.

2.- CLASIFICACION DE LOS MODELOS.

EXISTEN VARIAS FORMAS DE CLASIFICAR LOS MODELOS (2), (3), (4) Y (5). LA CLASIFICACION QUE VAMOS A USAR ES UNA MEXCLA ENTRE (2)) Y (5) QUE SE ILUSTRA EN LAS FIGURAS 2.1 Y 2.2.

LA PRIMERA SEPARACION QUE SE HACE ES ENTRE LOS MODELOS FISICOS O MATERIALES, Y LOS FORMALES.



Los MODELOS MATERIALES HAN SIDO MUY USADOS POR LOS INGENIEROS ARQUITECTOS Y COMO EJEMPLO DE ESTOS TENEMOS LOS MAPAS, LAS MAQUETAS Y LOS MODELOS A ESCALA. POR OTRA PARTE DURANTE SIGLOS LOS CIENTIFICOS Y ESTADISTAS HAN FORMULADO MODELOS, ALGUNOS MATEMATICOS - -- (LEYES DE NEWTON) Y OTROS DADOS POR ACEVERACIONES LOGICAS (CONSTITUCION POLITICA) AMBOS MODELOS SON DEL TIPO FORMAL Y REPRESENTAN PRO-- PIEDADES ESCENCIALES DEL SISTEMA ORIGINAL. A CONTINUACION EN LA -- FIGURA 2.2 (QUE FUE TOMADA DE (2)) SE HACE UN RESUMEN DE LA CLASIFICACION DE LOS MODELOS DANDO UN EJEMPLO CADA UNO DE ESTOS.

LOS MODELOS ESTATICOS SON AQUELLOS QUE NO VARIAN - CON EL TIEMPO, A DIFERENCIA DE LOS DINAMICOS, QUE SON AQUELLOS CUYAS CONDICIONES CAMBIAN CON EL TIEMPO. DENTRO DE - LOS MODELOS ESTATICOS Y DINAMICOS SE TIENEN MODELOS DETERMINISTICOS PROBABILISTICOS (o ESTOCASTICOS).

LOS MODELOS DETERMINISTICOS SON AQUELLOS CUYO RESULTADO O SALIDA DE SU ACTIVIDAD ESTA TOTALMENTE DETERMINADA EN TERMINOS DE SU ENTRADA.

LOS MODELOS ESTOCASTICOS o PROBABILISTICOS, SON AQUELLOS CUYA SALIDA VARIA, ALEATORIAMENTE SEGUN LOS EFECTOS DE LAS - ENTRADAS QUE RECIBA.

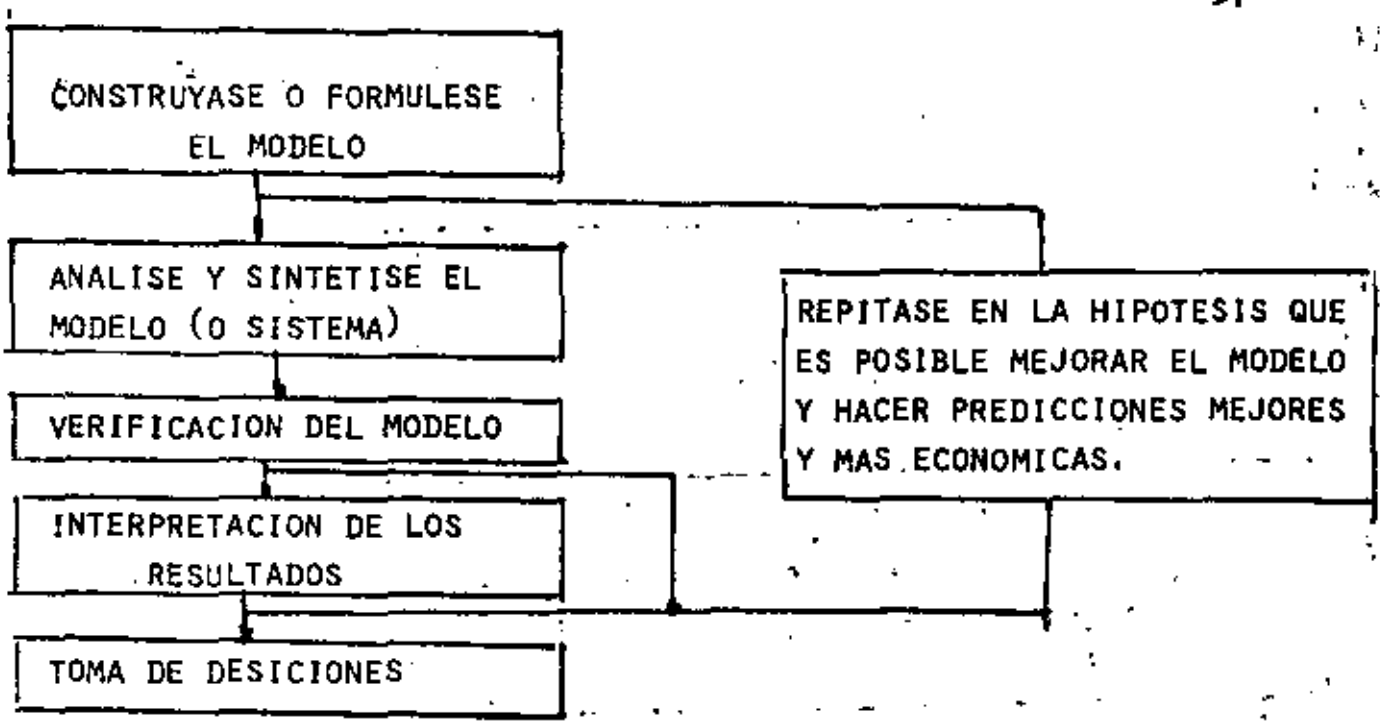
LOS MODELOS DEL TIPO REPLICA, SON AQUELLOS QUE CONSEVAN - TODAS LAS CARACTERISTICAS DE SU ORIGINAL, LOS CUASI-REPLICA, HAN PERDIDO UNA ESCALA, Y LOS ANALOGICOS GUARDAN UNA ANALOGIA CON EL MODELO ORIGINAL, SIN EMBARGO NO TIENEN PARENTESCO O SIMILARIDAD ALGUNA (EXCEPTO EN SU COMPORTAMIENTO).

LOS MODELOS SE PUEDEN CLASIFICAR TAMBIEN DE ACUERDO A LA FUNCION QUE DESEMPENAN, ESTO ES: LOS CUALITATIVOS Y LOS CUANTITATIVOS (6), A CONTINUACION SE DA UN EJEMPLO PRIMERO DE -- ESTOS TIPOS.

TODO MODELO QUE SE CONSTRUYE DEBE SEGUIR UNA SECUELA, - A CONTINUACION BREVEMENTE SE DESCRIBIRAN LAS ETAPAS EN EL -- DESARROLLO DE MODELOS;

		MATERIALES			FORMALES		
		REPLICA	CUASI-REPLICA	ANALOGICO	DESCRIPTIVO	SIMULACION	FORMAL
ESTATICO	DETERMINISTICO	ESTATUA	MAPA	ESCULTURA MODERNA	LIBRO ROJO DE MAO	TABLAS DE DESICIONES LOGICAS	LEY DE OHM
	PROBABILISTICO	PRUEBAS DE DOSIS	MAPA METEREOLOGICO	DADO MODELANDO RULETA RUSA	REPORTE DEL TIEMPO	PROGRAMA PARA JUGAR AJEDREZ.	
DINAMICOS	DETERMINISTICO	MODELO DE UNA PRESA	PLANETARIUN	CIRCUITO ELECTRICO EN COMPORTAMIENTO ANALOGICO	SISTEMA LEGAL	ALGORITMO DE RUTA CRITICA	
	PROBABILISTICO	EXPERIMENTO DE GENETICA			TEXTO DE EVOLUCION	MODELO DE TRANSPORTE	MODELO CON ECUACIONES DIFERENCIALES ESTOCASTICAS

4a.



EN EL PRIMER PASO DEBEMOS SELECCIONAR (O CONSTRUIR) UN MODELO SATISFACTORIO PARA EL TRABAJO DE PREDICCION A DESARROLLAR, IDENTIFICANDO LOS COMPONENTES, SUS RELACIONES, MECANISMOS Y VARIABLES DEL SISTEMA.

EN EL SEGUNDO PASO, AL ANALIZAR EL MODELO HAY QUE ESTABLECER LAS VARIABLES ENDOGENAS Y EXOGENAS DEL MISMO, DETERMINANDO LAS VARIACION DE LAS SEGUNDAS, YA QUE LAS PRIMERAS DEPENDEN DE LA FORMULACION DEL MISMO

ANTES DE TOMAR ALGUNA DESICION, DEBEMOS VERIFICAR EL MODELO, ESTO ES, SI LOS RESULTADOS OBTENIDOS ESTAN DE ACUERDO O SON COMPARABLES CON LAS OBSERVACIONES DEL MUNDO REAL O SI LOS RESULTADOS SON LOS QUE SE DESEAN OBTENER, SI NO HAY QUE REFORMULAR, POSTERIORMENTE (PASO 4) HAY QUE INTERPRETAR LOS RESULTADOS DE LA COMPARACION (MODELO) Y CON BASE A LA DISCREPANCIA ENTRE LOS RESULTADOS PRONOSTICADOS Y LOS OBSERVADOS, PODEMOS TOMAR UNA DESICION (PASO 5).

HAY QUE TENER CUIDADO EN LA FORMULACION DE MODELOS, PUES A MENUDO SE CAE EN FALACIAS, Y LAS MAS FRECUENTES SON:

A). FALACIAS DE NIVEL, EN DONDE SE CONSIDERA QUE LO QUE ES

CIERTO PARA TODO, ES CIERTO PARA LAS PARTES.

B) FALACIA INDIVIDUALISTA, DONDE SE CONSIDERA QUE LO QUE ES CIERTO PARA LOS INDIVIDUOS (O PARTES) LO ES TAMBIEN PARA LOS GRUPOS.

C) FALACIA HISTORICA, CONSIDERA QUE LOS SISTEMAS NO CAMBIAN CON EL TIEMPO.

3.- SIMULACION.

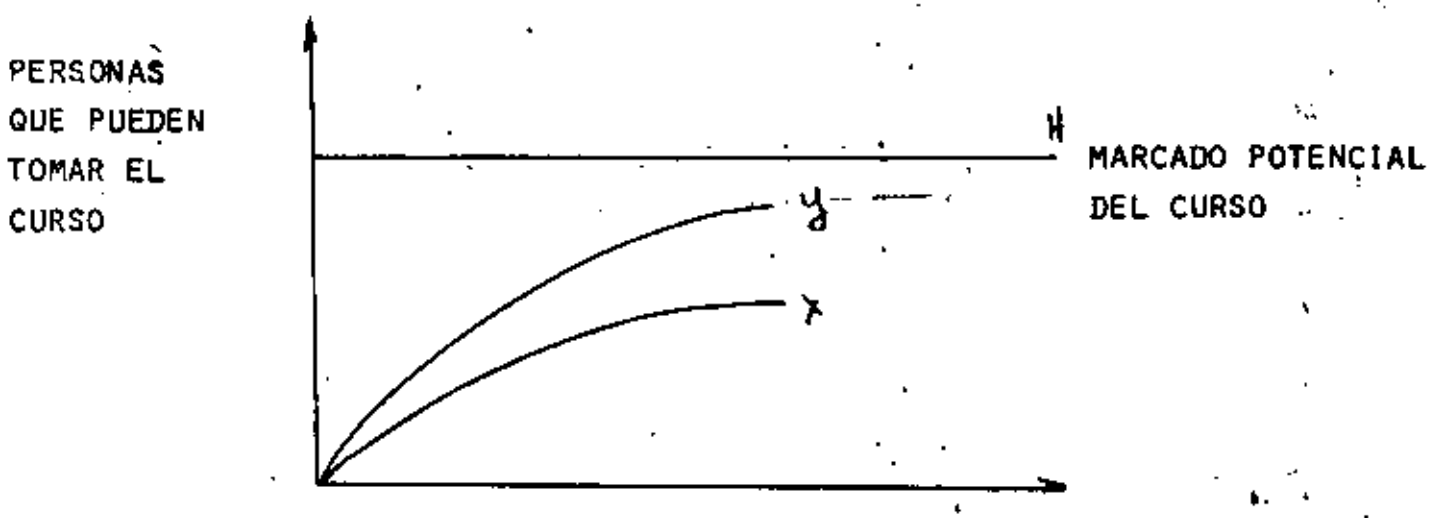
EN ESTA PARTE VAMOS A VER LA METODOLOGIA DE LA SIMULACION A TRAVES DE ALGUNOS EJEMPLOS, ASI COMO LA PARTE OPERATIVA MATEMATICA PARA LLEVAR A CABO LA SIMULACION DE UN MODELO COMO YA -- SE DESCRIBIO AL INICIO DE ESTE TEMA.

UN ASPECTO IMPORTANTE EN LA SIMULACION DE SISTEMAS, ES EL OBSERVAR LA RELACION ENTRE LAS VARIABLES ASI COMO SUS CAMBIOS - EN EL TIEMPO. LA SIMULACION ES ESENCIALMENTE UN METODO EXPE-- RIMENTAL PARA RESOLVER PROBLEMAS, USUALMENTE HAY QUE HACER - -- VARIAS "CORRIDAS" DE LA SIMULACION CAMBIANDO LAS VARIABLES EXO- GENAS, CON EL FIN DE ENTENDER EL SISTEMA, ES DECIR SE TRATA DE UN METODO EXPERIMENTAL.

DENTRO DE LA SIMULACION SE DISTINGUEN DOS TIPOS DE SISTE- MAS A SIMULAR: LOS CONTINUOS; QUE SON AQUELLOS CAMBIOS QUE OCU RREN EN FORMA SUAVE O LENTA, VERSUS LOS DISCRETOS QUE TIENEN -- CAMBIOS BRUSCOS, O SOLO DA EN INTERVALOS DE TIEMPOS NO CONTINUOS. NOTESE QUE ESTA CLASIFICACION NO SE INCLUYO EN EL PUNTO ANTERIOR DEBIDO A QUE NO DETERMINA SI LA TECNICA A UTILIZAR ES ANALITICA O MATEMATICA. PERO SU NATURALEZA (CONTINUA O DISCRETA) SE -- TORNA EN IMPORTANTE, AL DECIDIR EL TIPO DE COMPUTADORA A UTILI- ZAR (ANALOGICA O DIGITAL) ASI COMO EL LENGUAJE DE PROGRAMACION.

EL TIPO DE SIMULACION QUE NOS OCUPA EN ESTA PARTE DEL CURSO SON LOS MODELOS MATEMATICOS DINAMICOS NUMERICOS (FIG. 2) PARA ILUSTRAR LA TECNICA NUMERICA DE SIMULACION, CONSIDEREMOS EL SIGUIENTE EJEMPLO"

EL PROFESOR DE CURSO OBSERVA QUE EL NUMERO DE PERSONAS QUE SE LES PUEDE 'VENDER EL CURSO' DE SISTEMAS ES EL TOTAL DE GERENTES Y EJECUTIVOS DE EMPRESAS QUE NO LO HAN TOMADO. NOTESE QUE CON EL TIEMPO CIERTAS PERSONAS TOMAN EL CURSO Y LA TASA DE 'VENTA' DEL CURSO DISMINUYE A MEDIDA QUE MAS PERSONAS LO TOMAN. SEA H EL NUMERO DE GERENTES Y EJECUTIVOS POTENCIALES A TOMAR EL CURSO Y EL NUMERO DE GERENTES Y EJECUTIVOS QUE HAN TOMADO EL CURSO.



LA CURVA y INDICA EL NUMERO DE PERSONAS QUE HAN TOMADO EL CURSO EN UN TIEMPO 'T', MATEMATICAMENTE LA CURVA ANTERIOR SE PUEDE DESCRIBIR.

$$\dot{y} = K_1 (H - y) \qquad \begin{matrix} y \sim 0 \\ t \sim 0 \end{matrix}$$

NOTESE QUE LA PENDIENTE DE LA CURVA DECRESE SI H-Y DECRESE, Y ESTO REFLEJA UNA SATURACION DEL MERCADO.

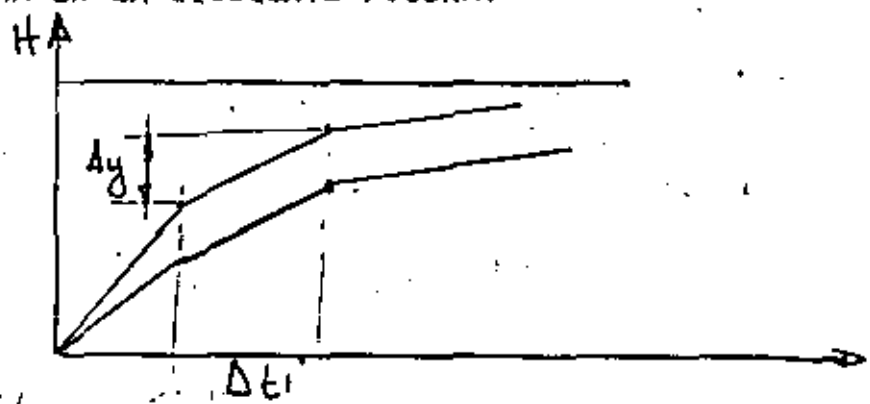
LAS "AUTORIDADES" (?) NOTAN QUE SE PUEDEN DAR UN SEGUNDO CURSO DIGAMOS 'SIMULACION DE SISTEMAS' LOS CLIENTES POTENCIALES DE ESTE CURSO SERAN LOS EJECUTIVOS Y GERENTES QUE YA TOMARON EL PRESENTE.

LLAMEMOS A X EL NUMERO DE PERSONAS QUE TOMAN EL CURSO - SIMULACION DE SISTEMAS, EL MERCADO NO SATISFECHO ES LA DIFERENCIA ENTRE X E Y, LA DEMANDA DEL SEGUNDO CURSO ESTA DESCRITA POR

$$\dot{X} = K_2 (y - x) \qquad \begin{matrix} x > 0 \\ t > 0 \end{matrix}$$

LAS DOS ECUACIONES CONSTITUYEN UN MODELO.

LA TECNICA A SIMULAR EL MODELO ANTERIOR (SIMPLE) CONSISTIRA EN CALCULAR PASO A PASO EL RESULTADO DE LAS ECUACIONES ANTERIORES. SUPONGAMOS QUE LOS CALCULOS SE HACEN EN INTERVALOS DE TIEMPO AL IGUALES, ES DECIR PASO A PASO Y ESTO - -- MUESTRA EN LA SIGUIENTE FIGURA:



LA TASA DE CAMBIO PUEDE SER INTERPRETADA COMO EL CAMBIO POR UNIDAD DE TIEMPO.

$$\text{CAMBIO DE } Y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

$$\text{CAMBIO DE } X = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

DE LAS ECUACIONES DEL MODELO PODEMOS ESCRIBIR

$$\Delta y_i = K_1 (H - y_i) \Delta t \qquad \Delta x_i = K_2 (y_i - x_i) \Delta t$$

COMO SE CONOCE X_i e Y_i RESULTA SENCILLO CONOCER LOS VALORES DE Y E X EN EL TIEMPO t_{i+1}, SIN EMBARGO NOTESE QUE LA ECUACION Δy_i DEBE RESOLVERSE ANTES, Y OBTENER EL VALOR DE Y_i PARA DESPUES PODER UTILIZAR ESTE.

EJEMPLO 2

MODELO DE COBWEB.

UN MODELO PARA PRESENTAR EL CONCEPTO DE RETRASO ES EL MODELO DE COBWEB (MODELO DE MERCADO). LOS MODELOS DE RETASO SON UTILIZADOS EXTENSIVAMENTE EN ESTUDIOS ECONOMETRICOS DONDE SE EMPLEAN PASOS MITORNES EN INTERVALOS DE TIEMPO (DIAS, MESES ETC), DE DATOS ECONOMETRICOS. EN ESTE TIPO DE MODELOS SE REQUIERE UN GRAN NUMERO DE DATOS ESTADISTICOS CON EL FIN DE ESTABLECER LAS DEPENDENCIAS Y EL VALOR DE LOS COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES.

EN EL SIGUIENTE MODELO ESTADISTICO SE RELACIONA LA DEMANDA D LA OFERTA O AL PRECIO DE MERCADO P. PARA QUE EL MODELO SEA REALISTICO LA OFERTA DEPENDERA DEL PRECIO DEL MERCADO EN EL TIEMPO (ANTERIOR), DADO QUE ES LA UNICA CIFRA CON LA QUE CUENTA EL SECTOR OFERTA EN EL MOMENTO DE LLEVAR A CABO PLANES FUTUROS. SIN EMBARGO LA DEMANDA DEPENDERA DEL PRECIO ACTUAL. EL MODELO DE DISTRIBUCION EN LA FORMA DE RETRASO ES"

$$Q = a - bP$$
$$S = c + dP_{-1}$$
$$Q = S$$

DADO UN PRECIO INICIAL P_0, EL VALOR DE S AL FINAL DEL PRIMER INTERVALO SE PUEDE OBTENER, LO CUAL DEFINIERA EL VALOR DE Q, DADO QUE EL MERCADO ESTA LIBRE, DE ESTE NUEVO VALOR SE PUEDE OBTENER P. EL VALOR PASADO SE TORNA EN VALOR USADO EN EL CALCULO DEL SEGUNDO INTERVALO, LA SIGUIENTE FIGURA NOS MUES

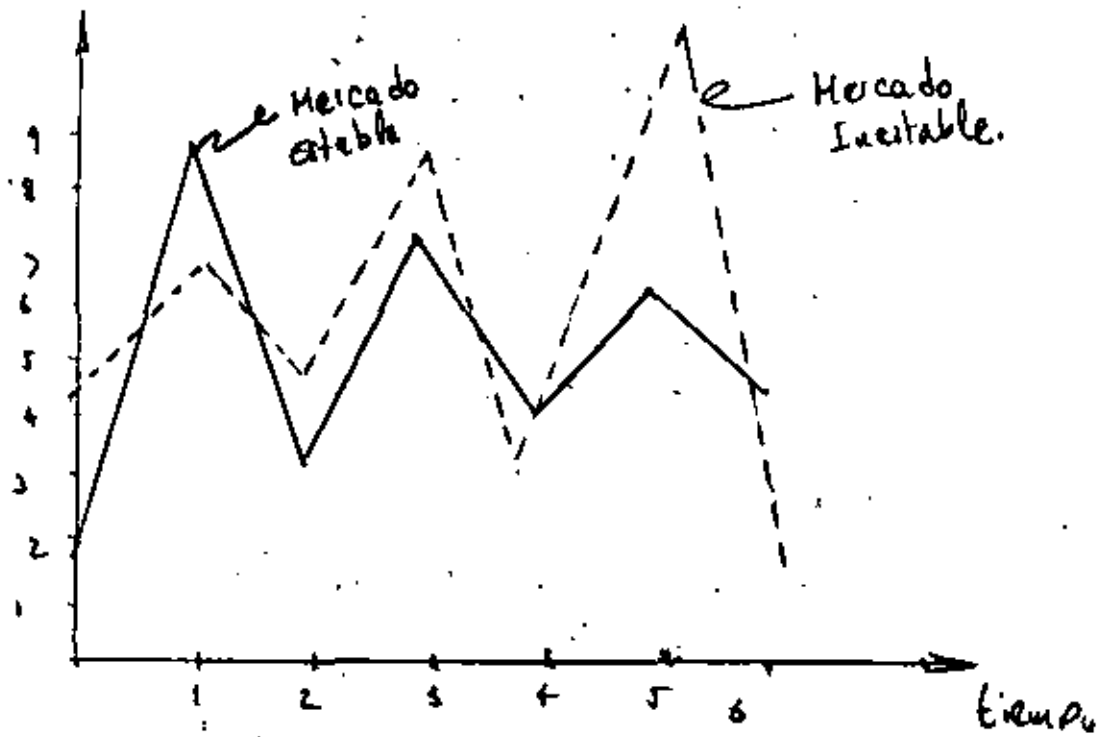
TRA FLUCTUACIONES EN EL PRECIO DEL MERCADO EN LOS SIGUIENTES CASO (2).

(a)

$P_0 = 1.0$
$a = 12.4$
$b = 1.2$
$c = 1.0$
$d = 0.9$

(b)

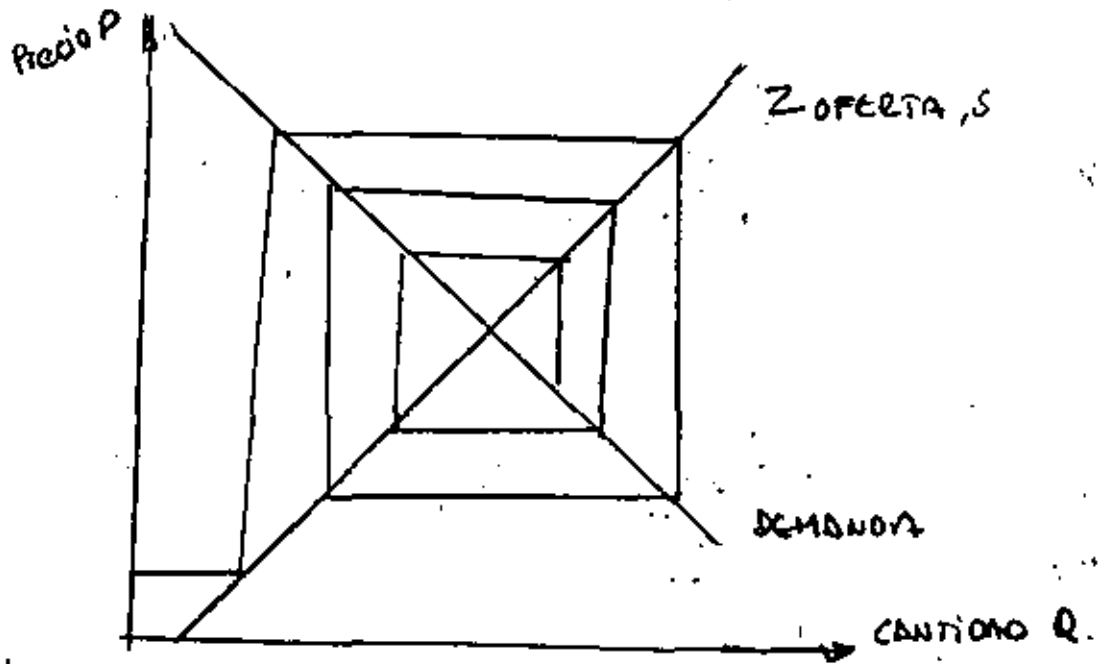
$P_0 = 5.0$
$a = 10.0$
$d = 0.9$
$c = -2.1$
$d = 1.2$



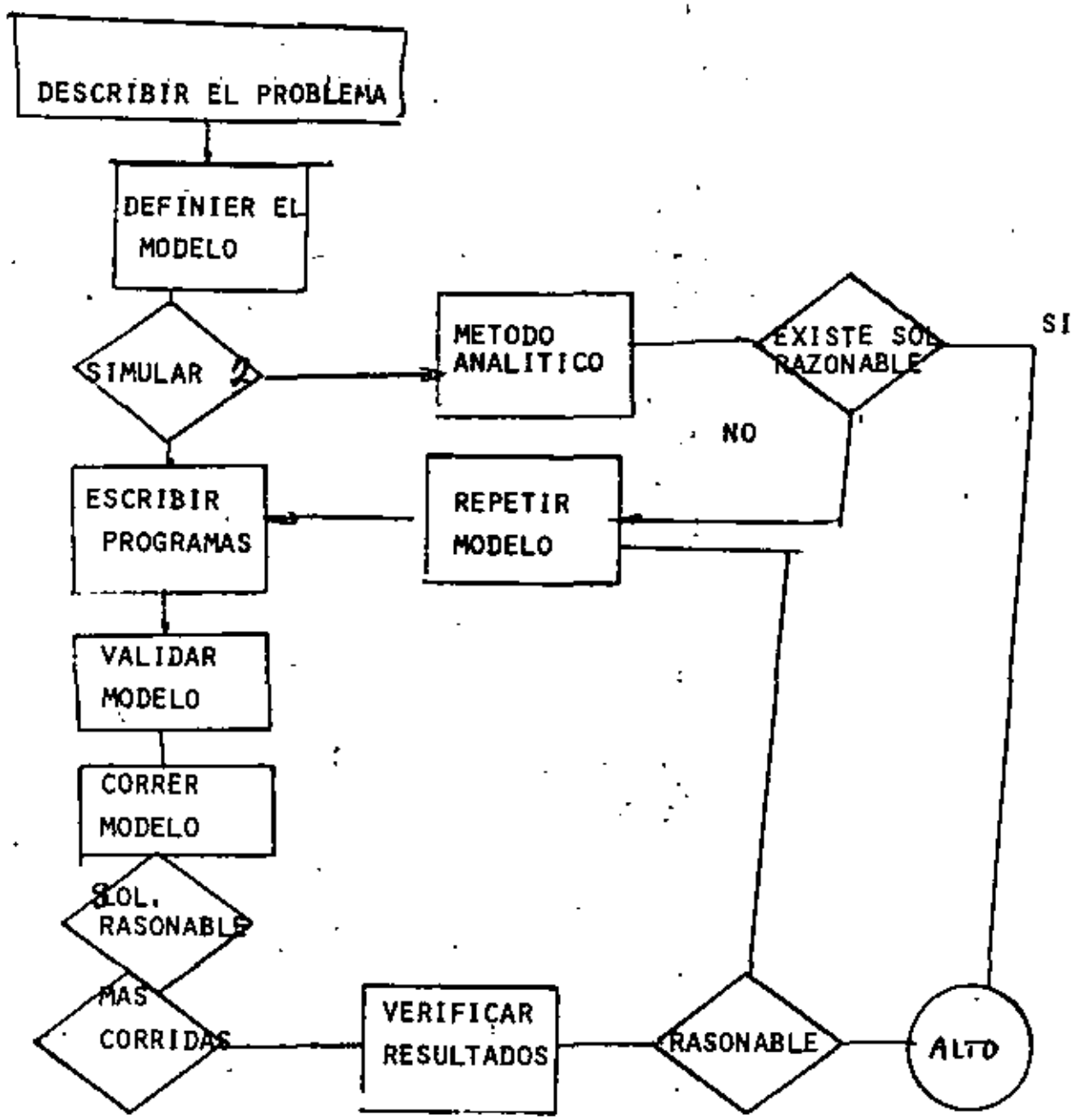
COMO SE PUEDE VER EN LA FIGURA ANTERIOR EL CASO A PREPRESENTA UN MERCADO ESTABLE EN EL CUAL EL PRECIO SE ESTABILIZA DESPUES

DE 5.43 UNIDADES, EL CASO (B) ES INESTABLE COMO UNA FLUCTUACION. ESTE TIPO DE MODELOS POR SU MANERA ESPECIAL DE RESOLVERSE GRAFICAMENTE (MASA ENTRETEJIDA O TELARA A) SE LLAMAN DE COBWEB EL METODO SE ILUSTRA EN LA SIGUIENTE FIGURA PARA EL CASO ESTABLE. LAS LINEAS PERPENDICULARES RELACIONAN LA DEMANDA Y LA OFERTA, SE INICIA CON UN PRECIO 1, UNA LINEA HORIZONTAL A LA OFERTA DETERMINA LA OFERTA A PRODUCIER A ESE NIVEL DE PRECIOS.

UNA LINEA VERTICAL HACIA LA DEMANDA DETERMINA EL HECHO QUE EL MERCADO ESTA"LIBRE" AL HACER LA DEMANDA IGUAL A LA OFERTA. CON ESTA PEQUE;A OFERTA, EL PRECIO SUBRE RAPIDAMENTE, CREANDO UNA NUEVA DEMANDA, QUE CREA UN NUEVO PRECIO (BAJO) Y ASI SUCESIVAMENTE.



VEAMOS A CONTINUACION EN EL SIGUIENTE GRAFICO QUE ES AUTO EXPLICATIVO EL PROCESO DE SIMULACION.



VEAMOS A CONTINUACION UNA BREVE INTRODUCCION AL LENGUAJE DE SIMULACION DYNAMO, ASI COMO UNA APLICACION UTILIZANDO ESTE.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

D Y N A M O

DR. MARCIAL PORTILLA ROBERTSON

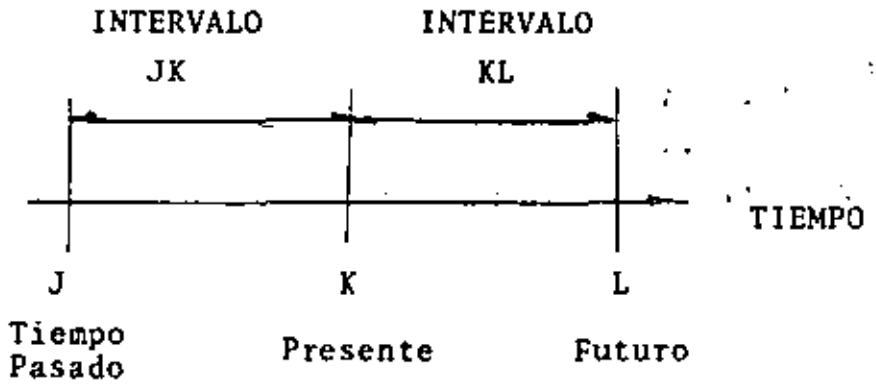
NOVIEMBRE, 1980

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 primer Méx 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. F I M-2285

DYNAMO

1.- NOTACION EN EL TIEMPO Y TIPOS DE VARIABLES

La base de la notación de tiempo, es el procedimiento mediante el cual la computadora calcula los resultados, esto es, mover en forma discreta (por pasos) las variables, y hacer un cálculo en cada paso



El tiempo para el cual se hacen los cálculos se llama TIME,- Tiempo Presente TIME K.- Tiempo Pasado en el cual se hicieron los cálculos TIME J.- Intervalo de tiempo TIME JK, ó -- TIME KL.

NIVEL.

Un nivel, el cual es calculado en el tiempo K, es una cantidad que depende del valor del tiempo J, y otras cantidades - del intervalo JK. (El nivel de un inventario hoy no es el -- mismo que el de ayer)

TASA (RATE).

Las decisiones en los modelos son "TASAS". La tasa es un -- flujo de "TANGIBLES" de un nivel a otro.

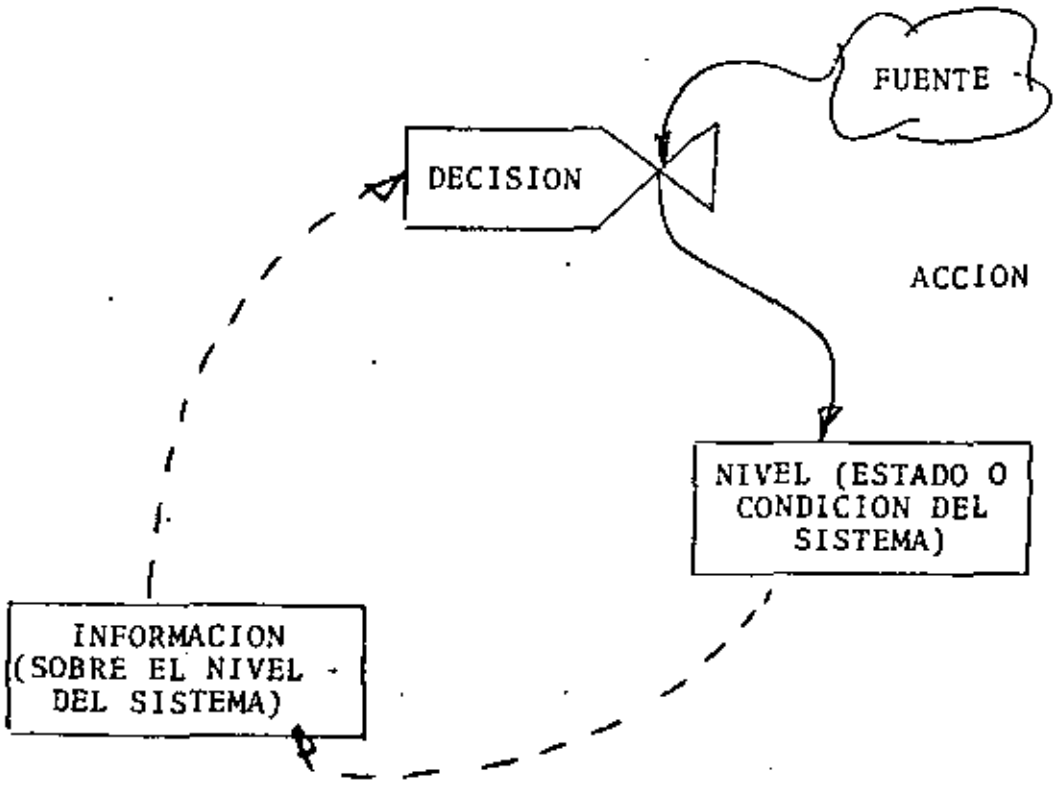
AUXILIAR.- (AUXILIARY)

Son variables introducidas para simplificar la tasa de las ecuaciones algebraicas.

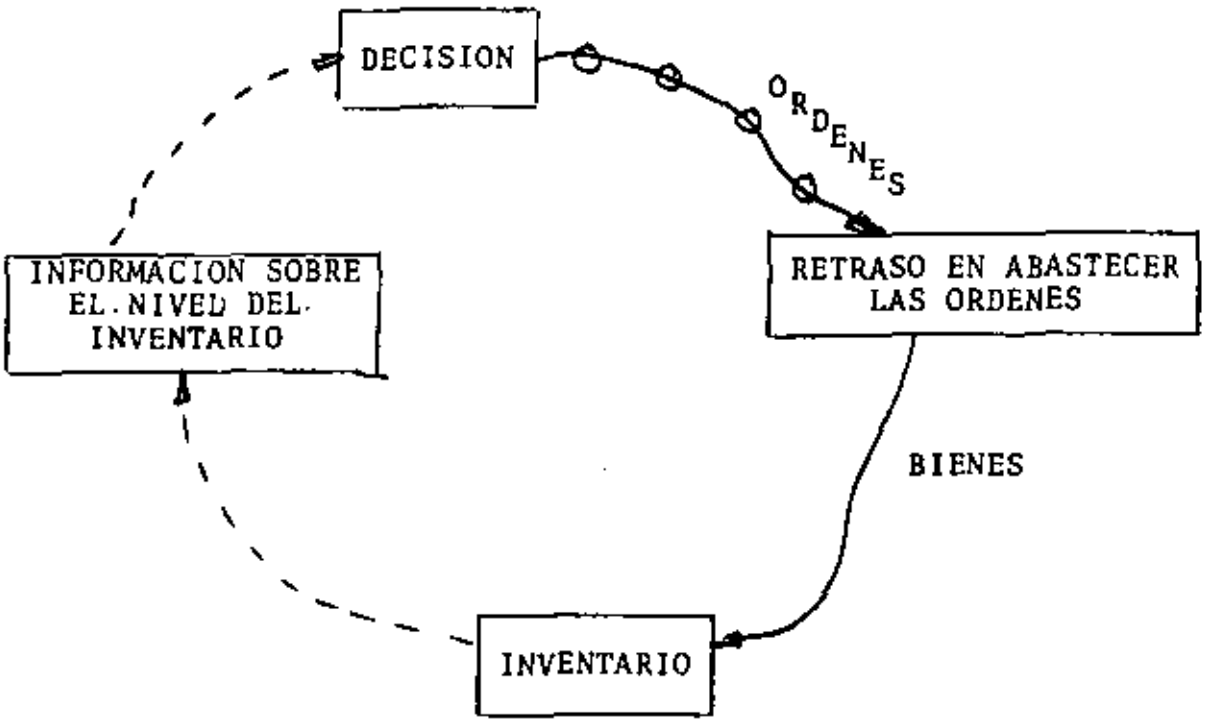
ORDEN DEL COMPUTO

El orden en que se llevan a cabo las computaciones es el siguiente:

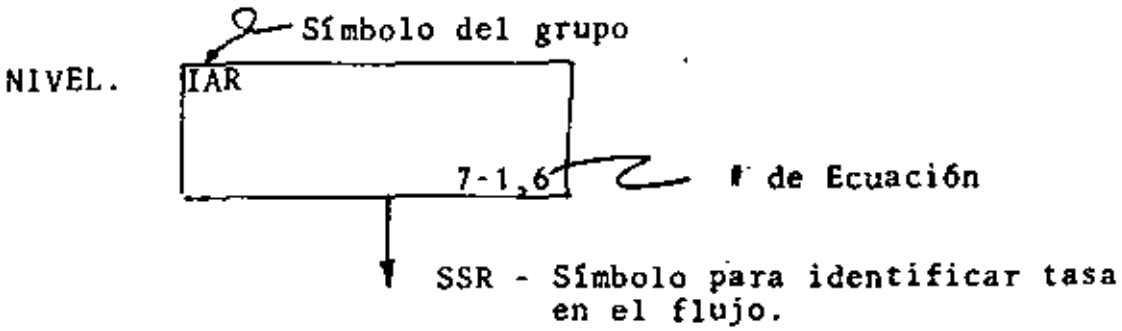
TIME K.- es el primer nivel, estos cómputos dependen de --- TIME J, y TIME JK, después las auxiliares, las cuales se computan con valores del último TIME K.



¿ COMO SE VERIA EL SIGUIENTE DIAGRAMA EN SU SISTEMA DE ORDENES DE INVENTARIOS ?



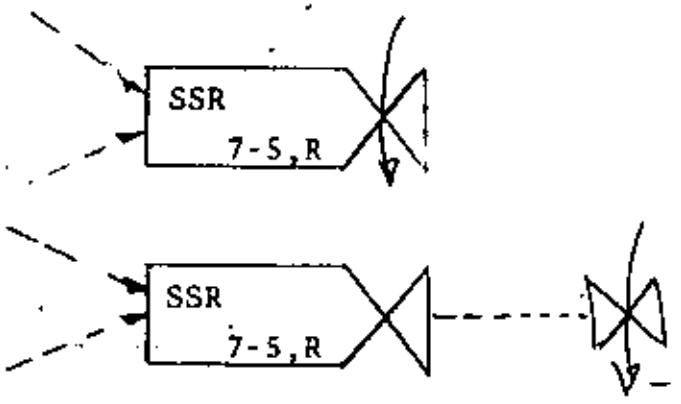
NOTACION QUE USAREMOS.



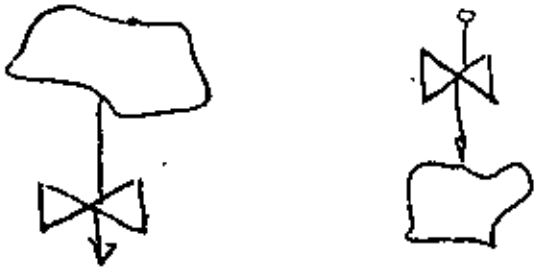
FLUJOS:

- - - - - - - - - → INFORMACION
——————→ MATERIALES
-o-o-o-o-o→ ORDENES
═══════→ CAPITAL, EQUIPO, HERRAMIENTAS, FABRICAS
--$--$--$- DINERO
═══════⇒ PERSONAL, POBLACION

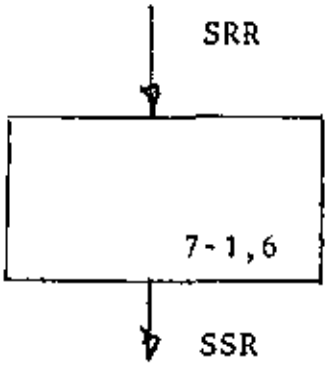
FUNCIONES DE DECISION (ACTUAN COMO VALVULAS EN LOS CANALES DE FLUJO)



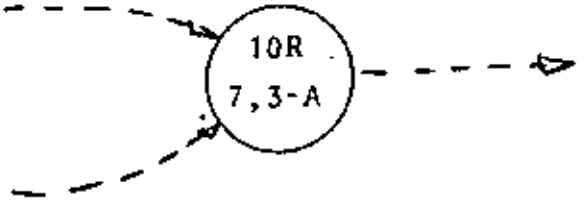
FUENTES Y POZOS



SALIDA Y ENTRADA DE MATERIAL O INFORMACION



VARIABLES AUXILIARES



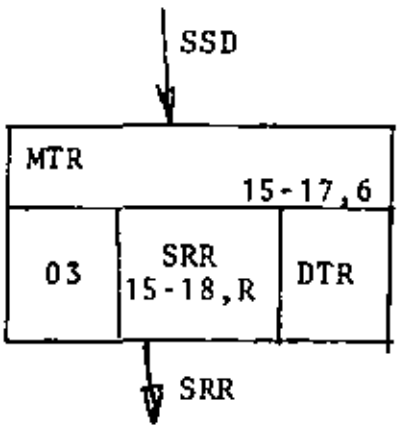
PARAMETROS Y CONSTANTES

VARIABLES EN OTROS DIAGRAMAS

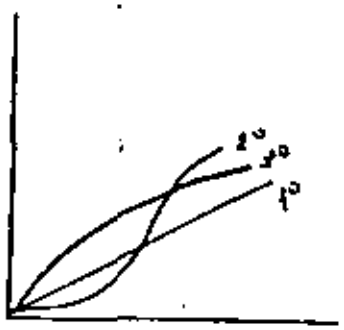
(D F D 15 - 24

(M T R 15 - 17, 6)

RETRASO. Los retrasos exponenciales pueden ser representados por una combinación de niveles y R tasas de flujo.

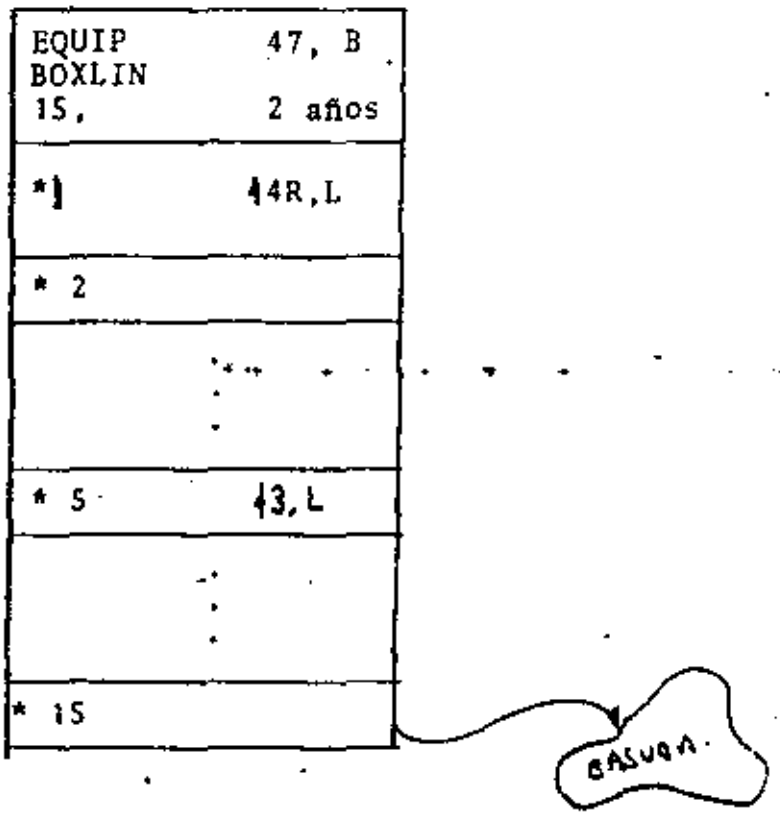


3 tipos de retraso



SSD TASA DE ENTRADA
MTR CANTIDAD (NIVEL) EN TRANSITO
15-17-6 ECUACION PARA EL NIVEL EN TRANSITO
03 ORDEN (3) DEL RETRASO
DTR CONSTANTE DE TIEMPO DEL RETRASO
SRR TASA DE SALIDA

LINEAR BOX LAR TRAIN



EQUIP	Nombre genérico dado al tren
47, B	# de ecuación que satisface las características del BOX CAR TRAIN
BOXLIN	Especifica una progresión lineal, de acuerdo al último BOX
15	# de boxes en el tren
2 AÑOS	Intervalo (pasos de 2 años)

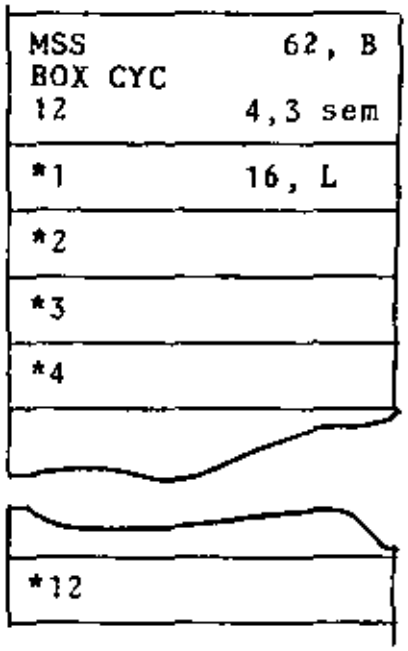
El flujo de equipo a la caja (BOX) uno —— y es acumulado por la ecuación de nivel #42

Equipo sale de la caja 5, controlado por la tasa que es integrada por la ecuación 43

La caja 15 * se descarta

Las cajas pueden ser identificadas por EQUIP*1, EQUIP*2, etc.

CYCLIC BOXCAR TRAIN
CAJA CICLICA



MSS Nombre genérico dado a todo el Tren
62,B # ecuación que nos dá las características del Tren
BOXCYC Especifica la recirculación de la última caja en el Tren
A la primera - 12 # de cajas en el LOOP
4,3 Semanas Intervalo
MSS*4 Identificación de la caja-4

RETRASOS.

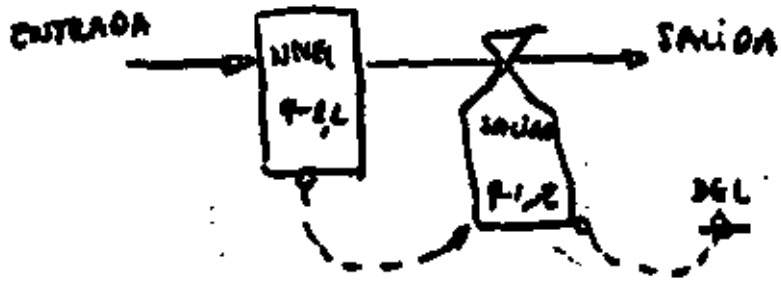
Los retrasos son muy importantes en las simulaciones con - - DYNAMO, en especial cuando se tienen lasos de retroalimentación, aunque en general se tienen retrasos en todos los canales, si éstos no resultan muy importantes (significativos) en el comportamiento del sistema, no los consideraremos.

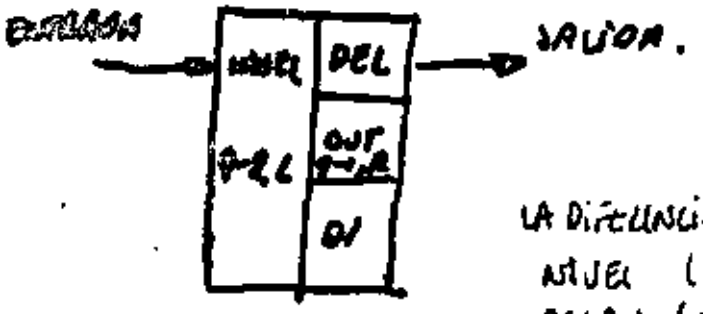
CARACTERISTICAS de los retrasos (DELAY)

1.- Intervalo de tiempo en el cual se considera el DELAY, éste afecta al estado estable del sistema
2.- El DELAY describe su "Respuesta Transitoria"

solamente consideraremos DELAYS EXPONENCIALES

DELAY DE 1er ORDEN.





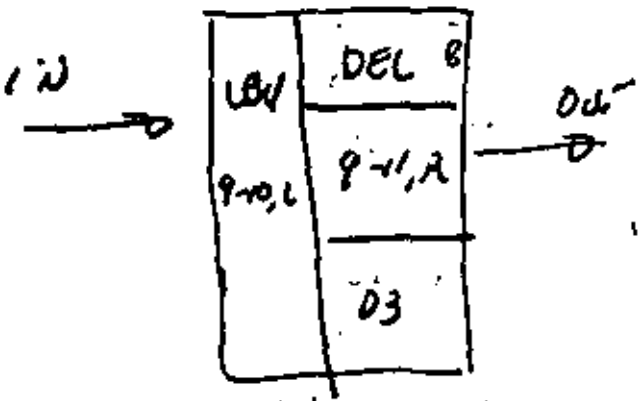
LA DIFERENCIA entre LA ENTRADA y LA SALIDA DEPENDEN DEL NIVEL (LEVEL) y EN EL PERIODO DEL DELAY (CONSTANTE) y LA ENTRADA PROVIENE DE ALGUNA PARTE DEL SISTEMA.

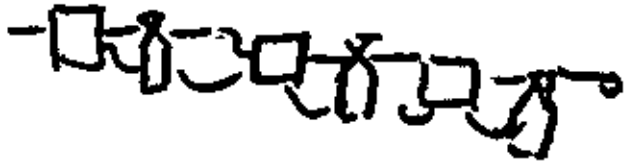
LA SALIDA SERA

$$OUT.KL = \frac{LEVEL.K}{DEL} \quad — \; q-1,R$$

OUT = OUT flow (UNIDADES / TIEMPO)
LEV = LEVEL (ALMACENADO EN EL DELAY) UNIDADES.
DEL = DELay. — CONSTANTE QUE REPRESENTA EL TIEMPO Y/2 PARA CAMBIAR EL DELAY - TIEMPO.

DELAY DE 3er ORDEN





LA REPRESENTACION DE UN DELAY NO ESTA COMPLETA SINO EXISTE UNA ECUACION QUE CONVIERTE EL NIVEL INTERNO A LAS UNIDADES DE PASO EN LEV (UNIDADES:

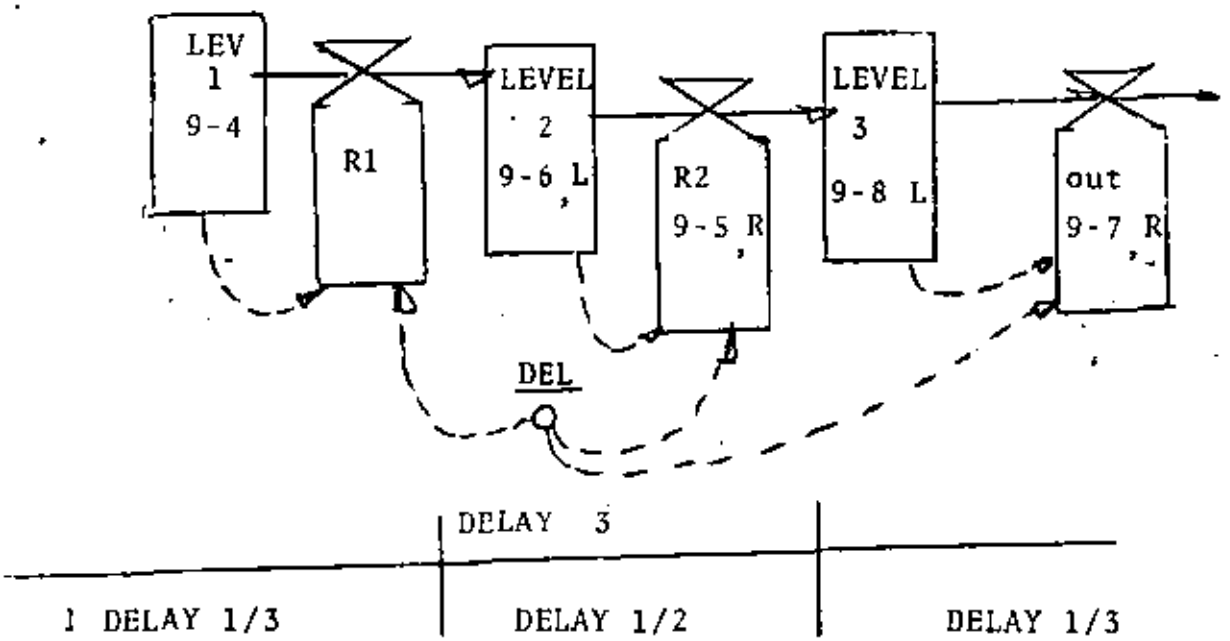
El nivel LEV guardado en el Delay es acumulado como la diferencia entre el flujo de entrada y el de salida.

LEV.K = LEV.J + (DT) (IN.JK-OUT.JK) - 9-2-L

LEV = el LEVel almacenado en el Delay (unidades)
DT = El intervalo de solución entre evaluaciones sucesivas de la ecuación (tiempo) ← muy importante

IN = inflow - dado por otra ecuación (unidades/tiempo)
OUT = OUTflow en unidades (tiempo)

en la caja anterior 0-10,L es el nombre de la variable de nivel y la ecuación definiendo el nivel de este caso D3 es un Delay de 3er. orden el cual se obtiene haciendo Delays en cascada



Un Delay de 3er.orden estará definido por 2 ecuaciones 9-1,R y 9-1,L

$$OUT.KL = \frac{LEV.K}{DEL\ 3}$$

Veamos el diagrama anterior en ecuaciones.

$$R1.KL = \frac{LEV\ 1.K}{(DEL)/3} \qquad 9\text{-}3,R$$

$$LEV.1.K = LEV2.J + (DT)(IN.JK - R1.JK) \qquad 9\text{-}4,L$$

$$R2.KL = \frac{LEV2.K}{(DEL)/3} \qquad 9\text{-}5,2$$

$$LEV2.K = LEV2.J + (DT)(R1.JK - R2.JK) \qquad 9\text{-}6,2$$

$$OUT.KL = \frac{LEV3.K}{(DEL)/3} \qquad 9\text{-}7,R$$

$$LEV3.K = LEV3.J + (DT)(R2.JK - OUT.JK) \qquad 9\text{-}8,L$$

SI QUEREMOS LA CANTIDAD TOTAL

LEV.K = LEVI.K + LEV2.K + LEV3.K

Notese que sería laborioso hacer lo anterior siempre, por lo que si queremos (como en general sucede) la cantidad total haremos lo siguiente:

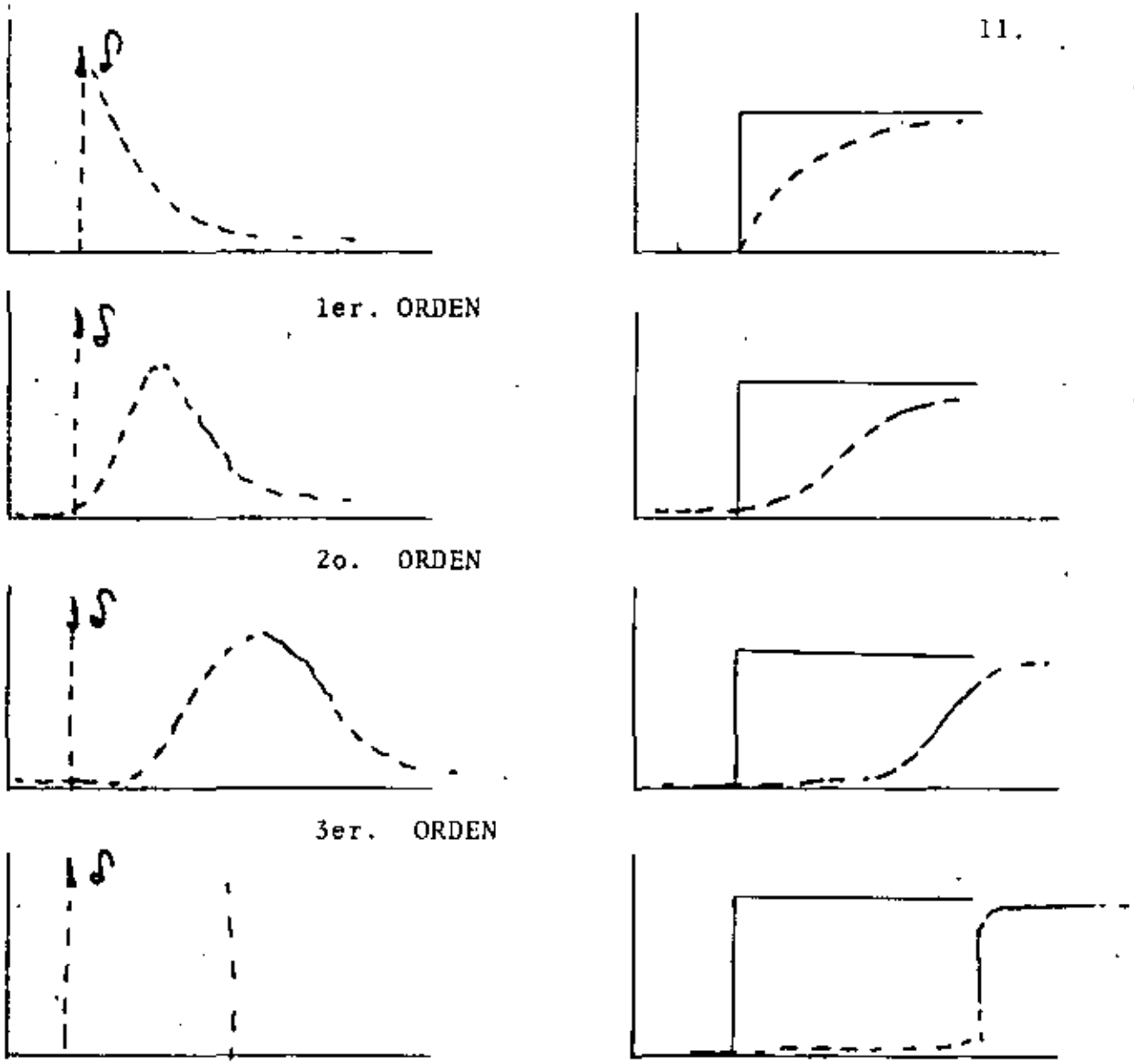
LEV.K = LEV.J + (DT) (IN.JK-OUT.JK) 9-10,L

y abreviando 9-3 9-8 9-2,L

OUT.KL = DELAY 3 (IN, JK, DEL) 9-11,R

Este DELAY se puede escribir de varias formas #'s, las cuales se veran más adelante

¿ COMO SON LOS DELAYS VS TIEMPO?



DIRECTO

En resúmen que tipos de variables (cantidades) tenemos?

L	LEVEL	(NIVEL)
A	AUXILIAR	
R	RATE	(TASA)
C	CTE DADA	
N	INITIAL VALUE	- VALOR INICIAL
B		
S	SUPLEMENTARIA	

Un Nivel (level) es una cantidad cuyo valor en un tiempo dado es calculado de su valor en el tiempo pasado de su tasa en -- cambio durante el tiempo en que se hacen los cálculos.

AUXILIAR (UX).- Es una cantidad introducida para simplificar un conjunto de ecuaciones, o porque no se tiene una ecuación a la mano.- Es auxiliar porque puede ser sustituída o eliminada en la tasa de ecuaciones.

RATE (TASA).- Es una cantidad cuyo valor indica una tasa en - el flujo durante un paso en el intervalo.

CONSTANTE .- Es un valor numérico, dado explícitamente y que no cambia en la corrida.

VALOR iNicial .- Son valores especificados para diferentes cantidades al inicio de la corrida.

Constante calculada iNicial.- son constantes que tienen una relación directa con otra(s) constantes y son calculadas al inicio de la corrida.

Nombres de cantidades.- 5 caracteres y el primero debe de - ser alfabético ie AB, inv PRODU1, A31 ER.
Note - Comentarios.

Forma de las ecuaciones.- Ver hojas adjuntas (tomadas del manual Dynamo)

V=V+(DT)(P+Q) IL V.K=V.J+(DT)(IPJQ)

V=V+(DT)(P+Q) 52 L V.K=V.J+(DT)(1/IY)(IP Q)
+y

(Modelo tiene 3-sectores Mayoreo Fábrica Menudeo y estos sectores

son muy parecidos en su forma de operar

En este problema los <u>niveles</u> serán:

* INVENTARIOS
* DE EMPLEADOS
* ORDENES POR SURTIR
* EQUIPO
* ORDENES EN TRANSITO
* BIENES EN TRANSITO

<u>TASAS</u> : (de flujo) estas serán las decisiones 'importantes' las decisiones controla el flujo de las tasas

DELAYS (RETRASOS).- Consideraremos todos los retrasos importantes que sufra el sistema.

NIVELES MENUDEO (ic.)

* Ordenes por surtir, o sea pedidos de los clientes que no han sido satisfechos.

* Bienes en el inventario (nivel de)

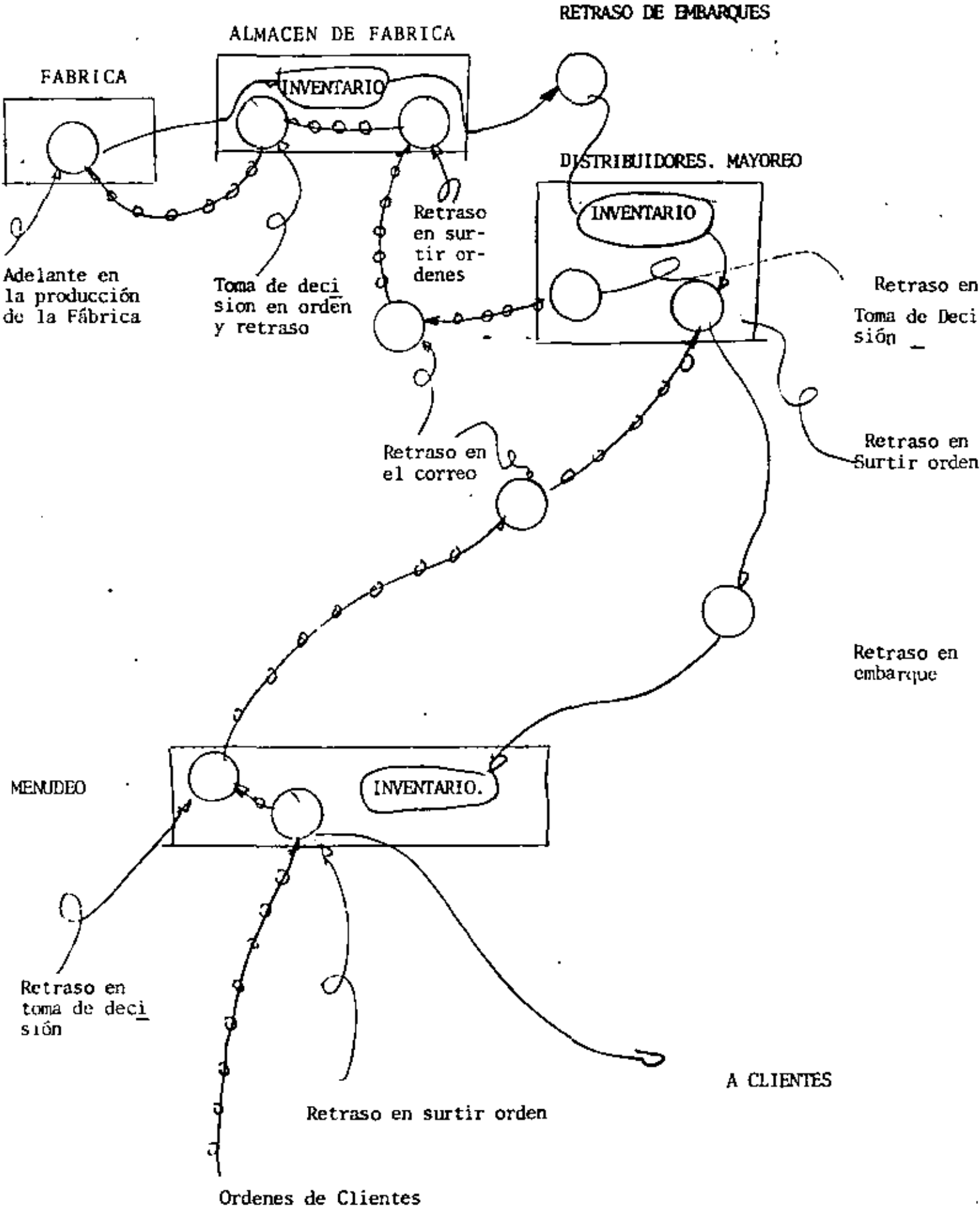
* Ventas (promedio) - utilizar esta información para decidir el nivel del inventario y ordenar a mayoreo.

LAS TASAS

- Ingreso obtenido de las ordenes (flujo) de los clientes
- Tasa de ordenes enviadas a los clientes
- Tasa de ordenes enviadas al distribuidor
- Tasa de bienes recibidos del distribuidor

RETRASOS

RETRASO en Mercado de ordenes
RETRASO en mandar los bienes
RETRASO en transmitir ordenes
RETRASO en envios


RETRASO DE EMBARQUES
ALMACEN DE FABRICA
FABRICA
INVENTARIO
DISTRIBUIDORES. MAYOREO
INVENTARIO
Retraso en surtir ordenes
Adelante en la producción de la Fábrica
Toma de decision en orden y retraso
Retraso en Toma de Decisión
Retraso en el correo
Retraso en Surtir orden
Retraso en embarque
MENUDEO
INVENTARIO.
Retraso en toma de decisión
A CLIENTES
Retraso en surtir orden
Ordenes de Clientes

Ejemplos tomados del Cap. 15 de dinámica industrial. De J. Forrester.

El inventario en el tiempo K es igual al inventario en el tiempo J más lo que se recibió durante JK, menos lo que se consumió durante JK.

IL* IAR.K= IAR.J+(DT)(SRR.JK-SSR.JK) 15-4 L

DT= 1 (semana)

IAR.- Inventario real actual (bienes)

DT .- Tiempo delta (semanas)

SRR.- Cargamento recibido

SSS.- Cargamento mandado

Similarmente las ordenes no embarcadas en el tiempo K son igual a las ordenes no embarcadas en J, más las nuevas ordenes en JK, menos lo mandado en JK.

VDR.K= VDR.J +(DT)(RRR.JK-SSR.JK) 15-1 L

VDR= ORDENES NO SATISFECHAS (BIENES)

RRR= PEDIDOS RECIBIDOS (BIENES/SEMANA)

SSR= CARGAMENTOS MANDADOS (BIENES/SEMANA)

si.- DFR.- Retraso en surtir las ordenes

IAR.- Nivel actual del inventario y veremos el mínimo de:

SSR.KL= MIN (VOR.K/DFR, IAR.K/DT)

* ecuación / de nivel.

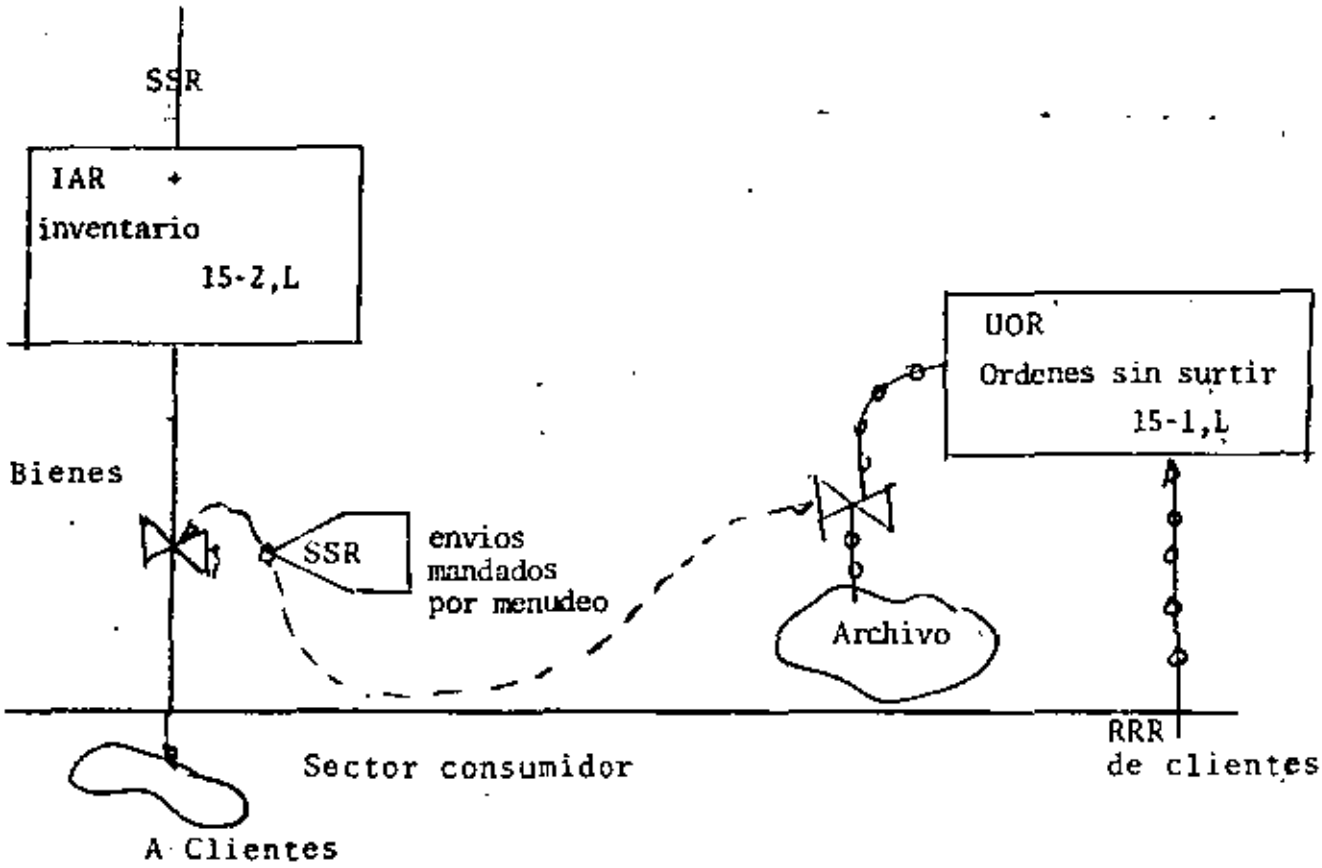
VOR.K=VOR.J+(DT)(RRR.JK-SSR.JK) 15-1,L

VOR.- Ordenes de menudeo por surtir (unidades de bienes/orden)

RRR.- Requisiciones (ordenes) recibidas en el menudeo (ordenes/semanas)

SSR.- Envios mandados por menudeo (unidades/semana)

DT .- Intervalo de tiempo (semana) entre la solución de ecuaciones.



La dimensión de la ec. anterior será

$$\text{Unidades}_{VOR} = \text{unidades}_{VOR} + (\text{semana})_{DT} \left(\frac{\text{Unidades}}{\text{Semana}}\right)_{RRR} - \left(\frac{\text{Unidades}}{\text{Semana}}\right)_{SSR}$$

Veamos ahora (de la figura anterior el inventario de Menudeo -IAR

IAR,K= IAR,J+DT(SSR.JK-SSR.JK) 15-2,L

IAR- Nivel actual del inventario menudeo (unidades)

SRR.- Envios recibidos por menudeo (unidades/semana)

SSR.- Envios mandados por menudeo (unidades/semana)

Nótese que las ecuaciones anteriores presuponen varias cosas, por ejemplo: Que los clientes compran (envio de bienes) a una tasa implícita, sin embargo el envío de bienes a clientes depende de la cantidad de ordenes sin surtir (VOR) listas para procesarse.- Nótese que los envios no dependen de la cantidad, VOR, sino de la habilidad de satisfacer VOR.

$$SSR.KL = \frac{VOR.K}{DFR.K}$$

SSR= Envios mandados del menudeo (a clientes) Unidades/Sem.

DFR= Retraso en llenar las ordenes (semanas)

EL DIAGRAMA COMPLETO SE VERA ASI:

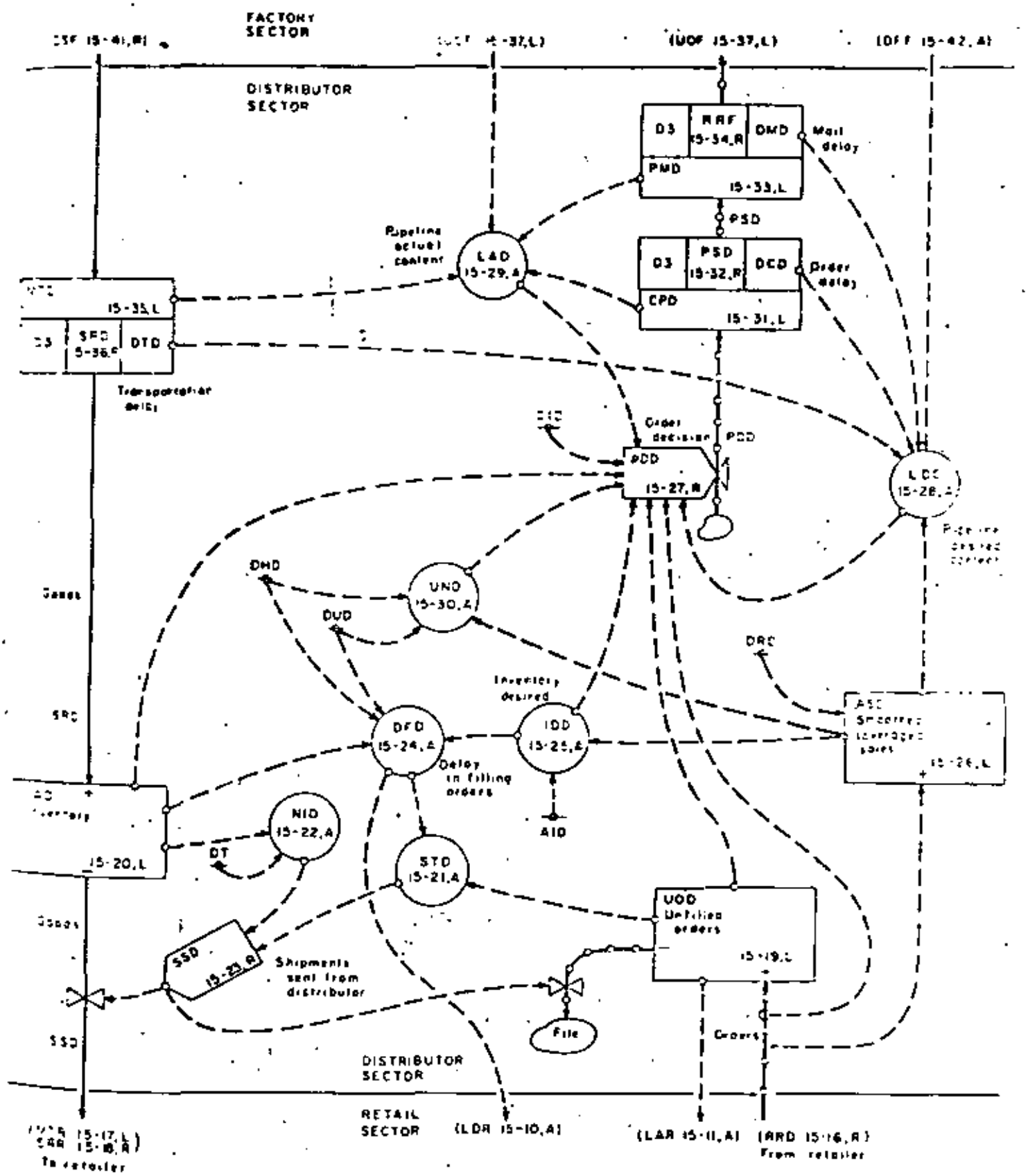


Figure 15-15 Flow diagram of distributor sector.

Por ejemplo:
Los DELAYS lucirán así:

CPR.K=CPR.J+(DT)(PDR.JK-PSR.JK) 15-13,L
PSR.KL= DELAY3 (PDR.JK,DCR) 15-14,R

donde
CPR= ordenes en proceso guia oficina de menudeo (unidades)
PDR= Tasa de decisión en la compra (menudeo) Unidades/semana.
PSR= Ordenes de compra mandadas del menudeo (Unidades/semana)
DCR= Retraso en la oficina en las ordenes de menudeo.
DELAY3.- Función de retraso 3er. orden.

y una auxiliar se verá así
UNR.K= (RSR.K) (DHR+DUR)

UNR.- Ordenes sin surtir en menudeo (nivel normal) unidades
RSR.- Requisiciones 'no avisadas' (IMDUTHED) en menudeo (Unidad/semana).
DHR.- Retraso en el manejo de tiempo en menudeo (semanas)
DUR.- Retraso en surtir ordenes, por no tener estas en Stock . (Semanas).

La clase pasada se dijo poco del SMOOTH
(no existe en todos los Dynamos, solo en versión II y III, esta función hace lo siguiente:
El"SMOOTHING" es un "filtro" para ruidos cortos (en tiempo) el 'Smoothing' cambia la sensibilidad del sistema, para distintas periodicidades que pueden existir en las fluctuaciones de los Datos.

Una vez escritas las ecuaciones en Dynamo existen 5 puntos que debemos verificar.

1 . Tenemos valores inciales ? TIME=0
2 . Tenemos datos de entrada ?
3 . ¿Asignamos valores a nuestras constantes? INV=3
4 . Debemos graficar y/o tabular algunas variables
5 . Debemos identificar nuestro modelo

1.- 12N VOR=(DFR)(RRR) iNitial
supongamos que RRR tiene un valor inicial, es

C RRR=XXX NOR

Supongamos que el nivel del inventario es suficiente si SSR= VOR/DFR, si SSR=RRR debemos entonces hacer VOR=(DFR)(RRR) y tenemos un valor inicial para uno de nuestros valores.

2.- El programa debe tener datos de entrada (los cuales no se pueden cambiar durante la corrida. (véase Cap. 12 industrial Dynamics). Utilicemos un escalón.- para determinar si los valores fueron usados durante un período estable, vamos a retrasar la entrada 5 semanas.

7R RRR.KL=RRI+RCR.K
45A RFR.K= STEP(STH,5)

donde STH es la altura del escalón

(Esta cte, se puede cambiar)

3 Ctes.

C LOCO=8
C DFR =1
C DTH =100

Las variables pueden tomar valores de 10^{-30} a $10+33$
pero $10^2=100$

SALIDA.- Hay que escalar cada variable de salida en de ie E+03 $\sim 10^3$ el resultado a la salida será 1000 veces el valor actual.
En forma tabular. E+00 por Default.

PRINT Time/1) IAR,IDR/2)VOR/3)RRR,SSR/) PSR,SRR

. Podemos imprimir hasta 10 variables.
. El tiempo siempre se imprime sin ser requerido.

TIME	IAR IDR	VOR	RRR SSR	PSR SRR
E+00	E xx JAR xx JDR	xx	xx xx	xx xx
0.08	8000.0 JAR 8000.0 IDR	1000.0	1000.0 100.0	100.0 100.0

misma columna — cambio de columna

. Se puede utilizar mas una tarjeta de print.
. Solo se puede utilizar una tarjeta de plot.

PLOT IAR=I,VOR=u / RRR=R, SSR=S, PSR=P, SRR=Q.

LETRA O SIMBOLO EN LA GRAFICA.

Se necesitan 3 tarjetas más para correr en Dynamo

SPECification

SPEC DT=0.1/length=50/PRT PER=2/PLT PER=0.5

MODELO PRODUCCION-DISTRIBUCION DE UN SISTEMA.
(TOMADO DE INDUSTRIAL DYNAMICS CAP. 15).

Este modelo es muy parecido al visto en clase y modelado en FORTRAN.- Las actividades principales en el modelo de esta clase serán:

* MATERIALES
* ORDENES
* DINERO
* PERSONAL
* EQUIPO (CAPITAL)
* INFORMACION

Para simplificar el modelo consideremos que no son de gran importancia el dinero, (flujo de) pues no influye este en la producción, ordenes de compra etc.
También quitemos al personal, y al equipo y presuponemos que: ambos entren en nuestro sistema.

Veamos como quedaría un modelo simplificado de producción distribución.

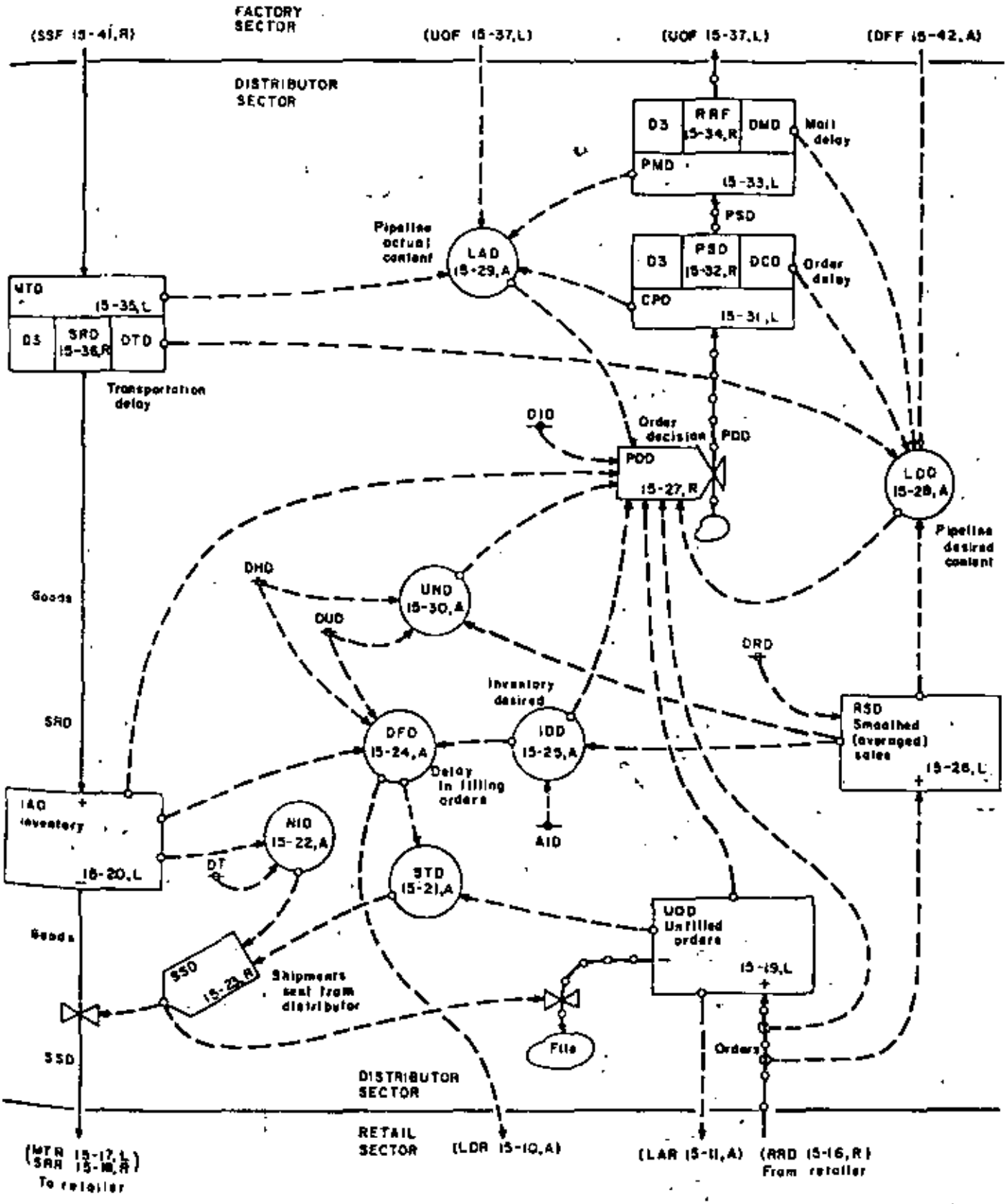


Figure 15-15 Flow diagram of distributor sector.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

ANALISIS ECONOMICO

DR. JOSE DE JESUS ACOSTA FLORES

NOVIEMBRE, 1980

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

INGENIERIA DE SISTEMAS

ANALISIS ECONOMICO

DR. JESUS ACOSTA FLORES

NOVIEMBRE, 1980.

El diseño de un sistema representa una decisión sobre cómo transformar los recursos en productos. Por ejemplo cómo transformar la mano de obra, la tierra y los materiales en unidades habitacionales. Al considerar un diseño, el ingeniero de sistemas deberá considerar tres factores principales:

1. La mecánica del proceso de transformación
2. El valor de los recursos
3. El valor de los productos

En general, el diseñador puede asignar los recursos solo al través de la selección del proceso de transformación, ya que difícilmente podrá afectar el valor de los recursos o de los productos.

El problema de asignación de recursos puede describirse matemáticamente por tres funciones asociadas con cada uno de los factores de diseño, el proceso físico de producción, el costo de los recursos y el valor de los productos. La función de producción describe el producto máximo que puede obtenerse de cualquier conjunto de recursos. La función de costo de los recursos, usualmente está defenida por el mercado económico para estos recursos. La función de valuación del producto está determinada o por un mercado o por un proceso político.

FUNCION DE PRODUCCION.

La función de producción es la descripción matemática del producto máximo que puede obtenerse de cualquier conjunto dado de recursos (X_1, ... X_n) :

Función de producción : $Z = g(X_1, \ldots, X_n)$

El dinero y el valor no son parte del modelo; Z se expresa en unidades de producción y las X_j representan recursos físicos. (no monetarios).

CARACTERISTICAS DE LA FUNCION DE PRODUCCION.

Se examinarán sus características en detalle: primero, su tasa de cambio con respecto a cambios en la cantidad utilizada de un recurso; se-

gundo, su tasa de cambio con respecto a cambios proporcionalmente iguales en todos los recursos; y finalmente si la función de producción tiene un solo óptimo. (región convexa)

Rendimientos marginales decrecientes. El carácter de la función de producción en un punto se describe por la tasa de cambio del producto cuando se suman o se restan unidades de los recursos individuales. Esta tasa de cambio se conoce como el producto marginal MP_j con respecto a cada insumo X_j.

$$MP_j = \partial Z/\partial X_j \qquad o \qquad MP_j = \Delta Z/\Delta X_j$$

La función de producción consiste en general de dos partes, una donde MP_j aumenta cuando X_j aumenta y la otra donde MP_j disminuye cuando X_j aumenta. En esta segunda parte los rendimientos marginales son decrecientes. Esta característica es importante porque garantiza que la función de producción acota una región convexa y por tanto tiene un solo óptimo.

Rendimientos a escala. Otra forma para describir una función de producción es al través de su tasa de cambio cuando se modifican todos los insumos proporcionalmente. Esta tasa de cambio se conoce como rendimiento de escala.

Rendimiento de escala : $Z = g((1 + \ )X_1,\ldots,(1 + \ )X_n) - g(X_1,\ldots,X_n)$

La forma general de la función de producción puede volverse a escribir. $\lambda^k Z = g(\lambda X_1,\lambda X_2,\ldots,\lambda X_n) = \lambda^k g(X_1,X_2,\ldots,X_n)$

Rendimientos de escala pueden ser crecientes, decrecientes o constantes dependiendo si la tasa de cambio en el producto es mayor, menor o igual que la tasa de cambio de los insumos, esto es, si el factor K es mayor, menor o igual a 1.

Se han observado economías de escala en la construcción de túneles, gasoductos, plantas de tratamiento de agua, en la generación de energía

eléctrica.

Regiones factibles convexas. Una región es convexa si al unir dos puntos cualesquiera de la región por una línea recta, ninguna porción de la recta está fuera de la región.

La función de producción acota una región convexa de combinaciones factibles de insumos y producto si se tienen rendimientos decrecientes y no existen rendimientos crecientes de escala.

ISOCUANTAS. Después de examinar las propiedades de la función de producción ahora se consideran sus implicaciones para el diseño. El punto más importante es que, en general, no existe un solo diseño óptimo sobre la base exclusivamente de razones técnicas o físicas. Un diseño óptimo puede determinarse solo al través de la consideración conjunta de muchas consideraciones técnicamente eficientes del sistema y de los valores relativos de los recursos y del producto. La intercesión de estos dos factores, mecánicos y económicos determina un diseño óptimo.

De la definición de función de producción se ve que un nivel de producción Z* puede obtenerse con diferentes combinaciones de los recursos. Cada una de estas combinaciones por pertenecer a la función de producción es técnicamente eficiente. Este concepto es básico en Ingeniería de Sistemas porque provee la motivación de buscar entre muchos diseños alternativos la mejor solución posible.

Una isocuanta es el lugar geométrico de todas las combinaciones tecnicamente eficientes de recursos para un nivel dado de producción.

A fin de determinar el diseño óptimo es necesario examinar la naturaleza de la isocuanta. Su tasa de cambio en cualquier punto se conoce como la tasa marginal de substitución (MRS). La tasa marginal de substitución puede determinarse formulando la expresión para el cambio incremental en producto en cualquier punto,

$$Z = \sum_j \frac{\partial Z}{\partial X_j} \partial X_j = \sum_j MP_j \partial X_j \qquad j = 1 \rightarrow n$$

Donde MP_j es el producto marginal para un solo recurso. Por definición $\partial Z = 0$ en la isocuanta y todas las $\partial X = 0$ excepto ∂X_i y ∂X_j. Por consiguiente

$$Z = MP_i \partial X_i + MP_j \partial X_j = 0$$

Luego la tasa marginal de substitución es

$$MRS = \frac{\partial X_i}{\partial X_j} = - \frac{MP_j}{MP_i}$$

OPTIMIZACION POR ANALISIS MARGINAL.

Hasta este punto se ha discutido exclusivamente el modelo del sistema físico. Para definir la asignación óptima es necesario considerar los modelos de valor de los recursos y del producto.

El proceso de transformación de recurso total puede representarse matemáticamente:

1. Para el proceso físico:

$X = (X_1, \ldots, X_n)$ = Cantidad de recursos.

Z = Cantidad del producto.

g = Función de producción, $Z = g(X)$

2. Para los modelos de valor:

$h(X)$ = Costo de los recursos.

$V(Z)$ = Valor del producto.

$= V(Z) - h(X)$ = Valor neto de transformar los recursos X en el producto Z.

El problema puede representarse como uno de optimización:

Maximizar: $= V(Z) - h(X)$.

Sujeto a la restricción: $Z \leq g(X)$.

Esta formulación puede resolverse explícitamente cuando el valor del producto y el costo de los recursos tienen las mismas unidades. Si no es así entonces deben resolverse uno de los dos problemas siguientes:

Problema 1.

Minimizar el costo total produciendo una cantidad fija.

Problema 2.

Maximizar la producción sujeta a un presupuesto fijo o a recursos limitados.

Los proyectos pequeños usualmente son del primer caso. La inversión en gran escala se enfoca como problemas de la segunda.

Análisis Marginal. El análisis marginal es un proceso de optimización que busca iterativamente el óptimo mejorando la solución existente en la dirección de la mejora más grande.

La aplicación del análisis marginal puede verse como un proceso de dos etapas. El primer paso, optimizar para un nivel dado de producción no requiere ningún conocimiento del valor del producto. El segundo paso es seleccionar el nivel más deseable de producción.

Criterio de Optimalidad. El criterio de optimalidad es la relación matemática que prevalecerá entre la función de la producción y el costo de los recursos en el punto óptimo. El criterio es que el producto marginal por unidad de costo de cada recurso debe ser igual para todos los recursos.

Ruta de Expansión y Función Efectividad-Costo. La ruta de expansión, es el lugar geométrico de todos los puntos óptimos para el rango completo de niveles de producción. Cada uno de estos puntos tiene un nivel de producción y un costo. Cuando se grafican los puntos anteriores se conoce como Curva de Efectividad-Costo.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

UNA ALTERNATIVA PROBABILISTICA AL CRITERIO DE MARKOWITZ PARA LA SELECCION OPTIMA DE UNA CARTERA DE INVERSION Y LA RELACION MATEMATICA ENTRE AMBOS CRITERIOS.

Dr. Javier Márquez Díez-Canedo

Noviembre, 1980

Palacio de Minería · Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-2285

RESUMEN:

En este artículo se repasa el modelo de H. Markowitz para la selección óptima de una cartera de inversiones bajo incertidumbre y se recuerda brevemente la crítica a la utilización de la varianza como una medida de riesgo. Se parte de una definición precisa de riesgo para justificar una alternativa probabilística y se obtiene una medida de riesgo sin los problemas mencionados para la varianza. En seguida se explora el modelo de selección óptima a que da origen este criterio y se demuestra que hay una relación matemática de correspondencia entre ambos modelos, que hace que la utilización del modelo propuesto resulte práctica para propósitos de aplicación.

I. INTRODUCCION

A principios de los años 50, Harry Markowitz [8] hizo una pequeña revolución en el sector académico interesado en finanzas. Por primera vez, se trataba explícitamente en un modelo matemático un criterio de riesgo para la selección óptima de una cartera de inversiones. Markowitz proporcionó un modelo que buscaba encontrar la composición de una cartera de inversiones que, a cierto rendimiento esperado, asociara el mínimo "riesgo".

Este planteamiento explícito tuvo repercusiones prácticamente inmediatas, tanto en el sector académico como en el terreno de la práctica. Empezaron a publicarse artículos que sugerían formas de resolver eficientemente los problemas matemáticos que generaba el modelo de Markowitz (Vgr. Sharpe [11], Hillier [6], etc.), para complementar algunos aspectos de la teoría económica (Vgr. Tobin [12]) y, se han hecho y siguen haciendo muchas aplicaciones (Vgr. [3]).

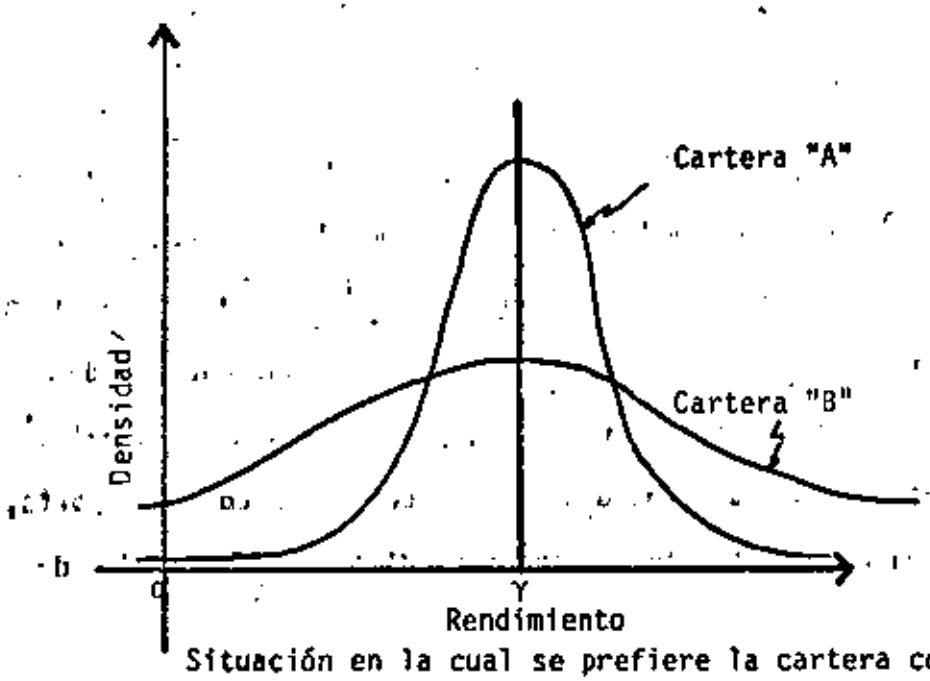
A pesar de que la contribución de Markowitz ha sido enorme, no ha dejado de tener sus críticas. Una de éstas se refiere al hecho de que adoptar como indicador de riesgo a la varianza del rendimiento de la cartera, acarrea problemas de "simetría". [4]

Esto significa que, bajo un criterio de minimización de va-

rianza, el tenedor de una cartera de inversiones, puede ser indiferente entre dos carteras, una con rendimiento menor que el esperado, y otra con rendimiento mayor, si la desviación respecto a la media es la misma. Es decir, la varianza, no distingue entre "sorpresas agradables" de obtener un rendimiento mayor que el esperado, y "sorpresas desagradables" de obtener rendimientos por debajo del esperado; lo único que importa, es qué tan concentrados estén los posibles rendimientos, alrededor de la media.

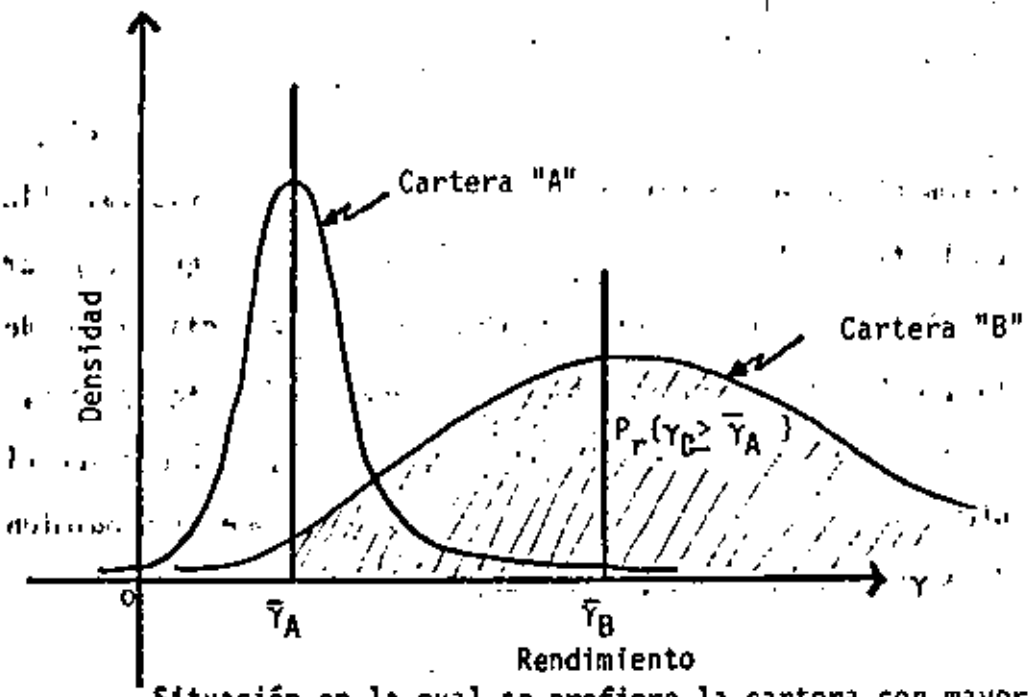
Obviamente lo anterior no es cierto para el caso de un inversionista interesado en obtener utilidades. Esta situación se ilustra en la figura 1. Así, se observa en 1(a) una situación en la que el criterio de minimización de varianza puede ser adecuado para mostrar preferencia por la cartera con menor varianza alrededor de la media, sobre otra con el mismo rendimiento esperado pero mayor varianza. Sin embargo, en la figura 1(b) se muestra una situación en la que, a pesar de la mayor dispersión de rendimientos alrededor de la media de una de las carteras, ésta se preferiría sobre la de menor dispersión ya que, aunque existe más incertidumbre sobre el rendimiento que proporcionará, es altamente probable que dicho rendimiento sea mayor que el rendimiento esperado de la cartera de menor varianza.

Markowitz respondió a esta crítica, proponiendo como medida de riesgo la "semi-varianza"; sin embargo esta medida también tiene



Situación en la cual se prefiere la cartera con menor varianza.

1 (a)



Situación en la cual se prefiere la cartera con mayor varianza.

1 (b)

Figura 1

ciertas dificultades (véanse [4] y [9]). En este trabajo se analiza un criterio probabilístico que busca aliviar el problema de simetría, al tiempo que adopta una definición más precisa de riesgo y se establece una relación matemática entre este criterio y el de Markowitz.

II. LAS MEDIDAS DE RIESGO Y LOS MODELOS PMI, PMR DE SELECCION OPTIMA DE CARTERA.

II.1 ¿Qué se entiende por riesgo?

Para los propósitos de este trabajo, se parte de la base de que un riesgo siempre está asociado a la posibilidad de que ocurra un evento indeseable. En el caso de un inversionista, la acción de decidir la composición de su cartera puede resultar en que ésta le proporcione un rendimiento distinto del deseado; o peor aún, inferior. En este caso, el evento indeseable que puede resultar de la acción de decidir es, obviamente, el obtener un rendimiento distinto o inferior al deseado.

Así, en el caso de la selección de cartera, el riesgo existe desde el momento en que hay incertidumbre respecto al rendimiento que se obtiene de los distintos instrumentos con los que se compone la cartera y, por lo tanto, existe la posibilidad de ocurrencia de un evento indeseable. El tamaño del riesgo depende, a su vez, de qué tan posible

es la ocurrencia del evento indeseable. Entonces, una medida del riesgo será una evaluación cuantitativa, de esta posibilidad.

II.2 La Medida de Riesgo de Markowitz y el Modelo de Minimización de Incertidumbre PMI.

Como se indicó en el punto anterior, Markowitz utiliza la varianza del rendimiento que proporciona la cartera, como medida de riesgo. Al hacer esto, establece implícitamente una equivalencia entre incertidumbre y riesgo.

Esto se debe a que, si la varianza es cero, hay total certeza de obtener el rendimiento esperado y, por lo tanto, no hay riesgo. En contrapartida, cuanto mayor sea ésta, mayor será la incertidumbre y, por lo tanto, el riesgo de obtener un rendimiento distinto al deseado.

Nótese que también implícito en lo anterior está como evento indeseable, el de obtener un rendimiento distinto del esperado. Es decir, para Markowitz lo indeseable es que suceda lo inesperado. Esto, a nuestro juicio, introduce una dificultad adicional a la simetría, cuando se quiere medir cuantitativamente la posibilidad de que ocurra el evento indeseable, y es lo siguiente:

Si los posibles rendimientos de la cartera tienen una función de densidad continua, como supone Markowitz, la probabilidad de que la cartera ceda el rendimiento esperado, es cero. Por lo tanto, hay total certeza de que ocurra lo indeseable. Recuérdese que para los propósitos de este trabajo la característica que debe tener la medida de riesgo, es la de cuantificar la posibilidad de que ocurra un evento indeseable. En el caso que hemos planteado, la probabilidad será uno, independientemente de qué tan grande o pequeña sea la varianza (siempre que no sea cero) y, por lo tanto, la propia selección del evento indeseable no es muy feliz para nuestros propósitos.

Por estas razones, preferimos pensar en el indicador de Markowitz, como uno de incertidumbre, más que uno de riesgo. Esto, de ninguna forma demerita el valor del trabajo ni le resta utilidad; solamente lo coloca en otra perspectiva, ya que, obviamente, el nivel de incertidumbre tiene repercusiones sobre la magnitud del riesgo.

Para concluir este breve repaso, recordamos ahora el modelo de selección óptima de cartera a que dió origen este indicador de incertidumbre.

Sea x_i = la proporción del presupuesto que se puede invertir en el instrumento de inversión "i";

$i = 1, 2, \ldots, n$

μ = El vector de rendimientos esperados de los "n" instrumentos de inversión que componen la cartera.

V = La matriz de varianza-covarianza de los rendimientos de los instrumentos que componen la cartera. (V es de dimensión (n x n)).

Además, supóngase que el vector "u" de rendimientos de los instrumentos de inversión, está normalmente distribuido según:

$$u \sim N(\mu, V)$$

Entonces, la composición de la cartera $(x^*)^T = (x_1^*, x_2^*, \ldots, x_n^*)$ que, para un rendimiento esperado γ minimiza la varianza, es aquélla que resuelve el siguiente problema de optimización:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{min.} & x^T V x \\ \text{s.a.} & \mu^T x = \gamma \\ & \mathbb{1}^T x = 1 \\ & x \geq 0 \end{array}\right\} \text{PMI}$$

donde "x^T" es el transpuesto del vector "x" y $\mathbb{1}$ es el vector <u>suma</u> cuyos "n" elementos son el número uno. Es decir: $\mathbb{1}^T = (1, 1, \ldots, 1)$

Así, el criterio de decisión, o función objetivo del programa no-lineal PMI, es minimizar la varianza ($\sigma^2(x) = x^T V x$) del rendimiento de la cartera, sujeto a las restricciones (i) de rendimiento esperado: $\mu^T x = \gamma$; (ii) de presupuesto: $1 1^T x = 1$; y (iii) de no-negatividad de las proporciones x_i que determinan la composición de la cartera: $x \geq 0$.

Entonces, en teoría, un inversionista que desee saber la composición de la cartera que minimice la incertidumbre de obtener un rendimiento próximo al esperado γ, la obtendría resolviendo PMI para x.

A una cartera que a cierto rendimiento esperado γ, asocie la mínima varianza, Markowitz la denominó <u>eficiente</u>. La definición conversa también aplica; es decir, una cartera es eficiente si es la que proporciona el máximo rendimiento esperado para cierto valor de la varianza. Esto último intercambiaría a $x^T\mu$ por $x^T V x$ en la función objetivo de PMI y la restricción $x^T\mu = \gamma$ por $x^T V x = \bar{\sigma}^2$. No es difícil convencerse que los dos son equivalentes.

Como es sabido, el problema de selección óptima de cartera bajo incertidumbre tiene complicaciones adicionales, ya que depende de la actitud que el inversionista tenga hacia el riesgo. Para este propósito, Markowitz introdujo el concepto de la <u>Frontera de Carteras Eficientes</u>.

Esta Frontera de Carteras Eficientes, está formada por las parejas (γ, σ^2) obtenidas al resolver PMI para todos los posibles valores de γ. Esto le presenta al inversionista un <u>panorama decisional</u> completo, ya que le indica cuanta varianza (o incertidumbre) debe "aceptar"

para cada nivel de rendimiento esperado γ. De esta manera, el inversionista puede elegir su cartera en base al rendimiento esperado deseado y al nivel de incertidumbre que esté dispuesto a aceptar.

II.3 Una Medida Probabilística de Riesgo y el Modelo de Selección Optima Correspondiente, PMR.

Considérese que el evento indeseable es que la cartera ceda un rendimiento inferior a un cierto nivel "α". Es decir, "α" es el rendimiento mínimo aceptable para el inversionista. Entonces, una medida del riesgo la proporciona la probabilidad de obtener un rendimiento inferior al mínimo aceptable α. Es decir, la medida del riesgo, para este evento indeseable es:

$$\rho = P_r \{u < \alpha\}$$

Con esta medida, el criterio de minimización de riesgo se traduce en minimizar ρ.

También se puede utilizar la proposición conversa; es decir, encontrar la cartera que dé mayores probabilidades de obtener cuando menos el rendimiento mínimo aceptable. Esto equivale a

$$\text{maximizar } \left[P_r \{u \geq \alpha\} \equiv 1 - \rho \right]$$

Es obvio que maximizar $1 - \rho$ es lo mismo que minimizar ρ.

Este criterio está exento de las limitaciones señaladas para σ^2, pero introduce otras complicaciones de tipo técnico y metodológico. Estas se harán evidentes a medida que avance la exposición. Sin embargo, se verá que algunas de las complicaciones son más aparentes que reales.

Si suponemos que los rendimientos u están normalmente distribuidos según $N(\mu, V)$ se puede demostrar que la función a maximizar es

$$z(x) = \frac{x^T \mu - \alpha}{\sqrt{x^T V x}}$$

(Véanse [5] ó [7]). Es decir, la composición de la cartera x* que maximiza a z, también maximiza a $1 - \rho$ (i. e., minimiza ρ).

Además, se ha demostrado que z(x) está normalmente distribuida según N(0,1) aún relajando un tanto algunos de los supuestos del teorema del límite central, con lo cual se amplía la aplicabilidad del criterio [7]. Así, el problema de encontrar la composición de la cartera x* que minimice la probabilidad "ρ" de obtener un rendimiento inferior al mínimo aceptable "α", se puede plantear como

$$\left.\begin{array}{ll} \text{maximizar} & z(x) \\ \text{sujeto a:} & \mathbb{1}^T x = 1 \\ & x \geq 0 \end{array}\right\} \text{PMR}$$

(Donde $\mathbb{1}$; x, μ y V son los ya definidos para PMI).

Siguiendo el concepto de Markowitz, resolviendo PMR para todos los posibles valores de α, se obtendría una "Frontera de Carteras de Mínimo Riesgo", caracterizada por las parejas $(\alpha, \rho(x^*))$. Nótese que si x^* resuelve PMR, con $z(x^*)$ es trivial obtener $\rho(x^*)$, ya que $z \sim N(0,1)$. Con esto se obtendría un panorama decisional completo sobre el cual el inversionista puede elegir una combinación (α, ρ), en donde a cada nivel mínimo de rendimiento se le indica el riesgo que deberá aceptar.

Así, para un rendimiento mínimo aceptable α y la composición x^* de la cartera que resuelve PMR, se tiene una medida precisa del riesgo en que se incurre, ya que $\rho(x^*)$ es la probabilidad de ocurrencia del evento indeseable (i.e. $\rho(x^*) = P_r\{\mu^T x^* < \alpha\}$). Por lo tanto, se conforma rigurosamente a nuestra definición de riesgo. Además, se supera el problema de simetría ya que $\rho(x^*)$, puede interpretarse también, como la probabilidad de tener una sorpresa desagradable, que sabemos es la mínima posible para el valor de α elegido, ya que la pareja $(\alpha, \rho(x^*))$ está en la frontera de carteras de mínimo riesgo.

III. LA RELACION MATEMATICA ENTRE PMI Y PMR

III.1. Los Teoremas

En primer término, es bien sabido que PMI es un problema de programación cuadrática cuya función objetivo $x^T Vx$ es convexa, ya que la matriz "V" de varianza-covarianza es positiva definida ($V > 0$). Esta propiedad es importante ya que garantiza que cualquier punto x^* que satisfaga las condiciones de Kuhn y Tucker para PMI es de hecho una solución global de PMI.

A continuación se demuestra que PMR tiene una propiedad análoga ya que su función objetivo es pseudo-cóncava en la región de interés.

Teorema 1:

$$z(x) = \frac{x^T\mu - \alpha}{\sqrt{x^T Vx}}$$

es una función pseudo-cóncava sobre la región.

$$\Omega = \{x \mid z(x) \geq 0;\ \ x \geq 0;\ \ \mathbb{1}^T x = 1\} \quad \text{1/}$$

Prueba: Tenemos que demostrar que z es diferenciable y que

$$\nabla z(x)^T (y-x) \leq 0 \implies z(x) \geq z(y) \quad \text{(Véase [2])}$$

Para toda $x, y \in \Omega$

1/ En realidad, el teorema es cierto para un conjunto menos restrictivo:

$\Omega = \{x \mid z(x) \geq 0;\ \ x \neq 0\}$.

a) Como $x \in \Omega$ se tiene que $x \neq 0$ y por lo tanto $x^T Vx > 0$ ya que $V > 0$. Entonces, el <u>gradiente</u> $\nabla z(x)$ que en este caso es el vector de primeras derivadas parciales de z respecto a x_i; $i = 1, 2, \ldots, n$ y que está dado por:

$$\nabla z(x) = \frac{\sqrt{x^T Vx}\,\mu - z(x)Vx}{x^T Vx}$$

es una función continua sobre Ω. Por lo tanto z es diferenciable sobre Ω. (siempre se toma la raíz positiva)

b) Exáminese $\nabla z(x)^T(y-x)$. Haciendo las operaciones algebraicas correspondientes, se obtiene que:

$$\nabla z(x)^T(y-x) = \frac{1}{x^T Vx}\left[\sqrt{x^T Vx}\,(\mu^T y - \alpha) - z(x)\,y^T Vx\right]$$

$$= \frac{1}{x^T Vx}\left[\sqrt{x^T Vx}\;z(y)\sqrt{y^T Vy} - z(x)\,y^T Vx\right]$$

Por lo tanto, $\nabla z(x)^T(y-x) \leq 0$ implica

$$z(y) \leq z(x)\,\frac{y^T Vx}{\sqrt{x^T Vx}\,\sqrt{y^T Vy}}$$

Ahora bien, la desigualdad de Cauchy-Schwarz dice que:

$$0 \leq \left| \frac{y^T V x}{\sqrt{x^T V x}\ \sqrt{y^T V y}} \right| \leq 1 \quad \text{y por lo tanto:}$$

$$\text{i.e.} \quad z(y) - z(x) \leq z(x) \left[\frac{y^T V x}{\sqrt{x^T V x}\ \sqrt{y^T V y}} - 1 \right] \leq 0 \qquad \blacksquare$$

<u>Corolario 1.1</u>: Si x^* satisface las condiciones de Kuhn y Tucker papara PMR, entonces es un máximo global único de PMR.

<u>Prueba</u>: Esto sigue inmediatamente de lo anterior ya que $z(x)$, que es la función objetivo de PMR es pseudo-cóncava y las restricciones de PMR son lineales. Es decir, en este caso, las condiciones de Kuhn y Tucker son suficientes para que x^* sea un máximo global único. Véase [2]. $\blacksquare$

La segunda propiedad que es más importante y que constituye el resultado principal de este trabajo es que hay una correspondencia entre las soluciones de PMI y las de PMR.

<u>Teorema 2</u>:

(i) Si x^* resuelve PMI, y el multiplicador de Lagrange β - asociado a la restricción $x^t \mu = \gamma$ es distinto de cero, entonces x^* también resuelve PMR para:

$$\alpha = \gamma - \frac{2\sigma^2(x^*)}{\beta}$$

(ii) Si x^* resuelve PMR, entonces también resuelve PMI para $\gamma = (x^*)^T\mu$ si $\gamma \neq \alpha$.

Prueba: Para demostrar el teorema se examinan las condiciones de Kuhn y Tucker para ambos problemas (Véase [2]).

Condiciones de K-T para PMI.

Se requiere:

$$\text{Factibilidad} \quad \begin{cases} \mathbb{1}^T x^* = 1 & \ldots\ldots \quad (1) \\ \mu^T x^* = \gamma & \ldots\ldots \quad (2) \\ x^* \geq 0 & \ldots\ldots \quad (3) \end{cases}$$

además se requiere:

$$2Vx^* + \beta\mu + \delta\,\mathbb{1} + \lambda = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

$$\text{(complementaridad)} \quad \lambda_i\, x_i^* = 0;\ i = 1,2,\ldots,n \quad (5)$$

$$\text{(no-positividad)} \quad \lambda \leq 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Donde los multiplicadores de Lagrange β y δ no tienen restricción de signos y están asociados a las restricciones (2) y (1), respectivamente. El vector de multiplicadores $\lambda^T = (\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n)$ está asociado a las restricciones de no-negatividad (3).

Condiciones de K-T para PMR

$$\text{Factibilidad} \begin{cases} \mathbb{1}\, x^* = 1 & \ldots\ldots (7) \\ x^* \geq 0 & \ldots\ldots (8) \end{cases}$$

$$\nabla z(x^*) + \delta' \mathbb{1} + \lambda' = 0 \qquad \ldots\ldots (9)$$

(complementaridad) $\lambda'_i\, x^*_i = 0; \quad i = 1, 2, \ldots n \qquad \ldots\ldots (10)$

(no-negatividad) $\lambda' \geq 0 \qquad \ldots\ldots (11)$

Donde δ' es el multiplicador de Lagrange irrestricto en signo asociado a la restricción (1) y λ' es el vector de multiplicadores asociado a (8).

$$\text{Sea } \theta = -\frac{\mu^T x^* - \alpha}{\left[(x^*)^T\, V x^*\right]^{1/2}} = -\frac{z(x^*)}{\sigma^2(x^*)}$$

i) Multiplicando (4) por $\frac{1}{2}\theta$ se obtiene:

$$\theta V x^* + \frac{1}{2}\theta\beta\mu + \frac{1}{2}\theta\delta\mathbb{1} + \frac{1}{2}\theta\lambda = 0 \qquad \ldots\ldots (12)$$

Examínese (9):

$$\nabla z(x^*) + \delta'\mathbb{1} + \lambda' = \frac{\mu}{\sqrt{(x^*)^T\, V x^*}} - \frac{(\mu^T x^* - \alpha)}{\left[(x^*)^T\, V x^*\right]^{1/2}} V x^* + \delta'\mathbb{1} + \lambda'$$

$$\text{i.e.}\quad \theta V x^* + \left(\frac{1}{\sqrt{(x^*)^T V(x^*)}}\right)\mu + \delta' \mathbf{1} + \lambda' = 0 \qquad \ldots\ldots (13)$$

Comparando (12) y (13) se obtiene la correspondencia siguiente:

$$\frac{1}{2}\theta\beta = \frac{\beta}{2}\left\{\frac{\mu^T x^* - \alpha}{[(x^*)^T V x^*]^{3/2}}\right\} = \frac{1}{\sqrt{(x^*)^T V x^*}}$$

es decir:

$$\alpha = -\frac{2(x^*)^T V x^*}{\beta} + \mu^T x^* = -\frac{2(x^*)^T V x^*}{\beta} + \gamma = \gamma - \frac{2\sigma^2(x^*)}{\beta}$$

y además:

$$\lambda' = \frac{1}{2}\theta\lambda; \quad \delta' = \frac{1}{2}\theta\delta \qquad \blacksquare$$

ii) Supóngase que x^* resuelve PMR y que $\mu^T x^* = \gamma \neq \alpha$. Entonces, se puede establecer la correspondencia siguiente entre los multiplicadores de Lagrange de ambos problemas:

$$\beta = \frac{2}{\theta\sqrt{(x^*)^T V x^*}} = \frac{2(x^*)^T V x^*}{\gamma - \alpha} = \frac{2\,\sigma^2(x^*)}{\gamma - \alpha}$$

$$\delta = \frac{2\delta'}{\theta} \qquad \text{y} \qquad \lambda = \frac{2}{\theta}\lambda' \qquad \blacksquare$$

III.2 Discusión de los Resultados

Respecto al primer teorema, sólo dice que la función objetivo tiene propiedades deseables de concavidad sobre la región factible y, por lo tanto, PMR es un problema bien comportado, en el sentido de que cualquier solución de PMR es de hecho una solución óptima única. Este resultado es claramente deseable para garantizar que la cartera obtenida al resolver PMR es única y óptima.

El segundo resultado es el más interesante. En esencia, el teorema dice que hay una correspondencia entre las carteras obtenidas de resolver el modelo de Markowitz PMI y PMR. Es decir, que bajo ciertos valores de los parámetros μ, V y γ, x^* resuelve tanto PMI como PMR. Las implicaciones de este resultado son, a nuestro juicio, muy importantes y las razones son las siguientes:

i) Si x^* es una composición de la cartera que resuelve PMI y se conocen los multiplicadores de Lagrange de PMI asociados a x^*, entonces es posible encontrar α tal que x^* también resuelve PMR para este nivel de rendimiento mínimo aceptable de la cartera.

Este resultado es importante tanto desde el punto de vista teórico, como práctico. Teórico, porque nos dice que un punto sobre la frontera de carteras eficientes, también está sobre la frontera de carteras de mínimo riesgo; es decir, que si conocemos la frontera de carteras efi

cientes, podemos conocer la de carteras de mínimo riesgo. Práctico, porque es más fácil resolver PMI que PMR. Actualmente, hay métodos numéricos que pueden resolver PMI de manera muy eficiente, proporcionando además, los multiplicadores de Lagrange relevantes. Por lo tanto, es posible encontrar ambas fronteras, resolviendo solamente PMI.

ii) Si x^* resuelve PMR entonces también resuelve PMI; es decir, cualquier cartera que sea una solución de PMR es además eficiente, siempre que $(x^*)^T\mu \neq \alpha$. Por lo tanto, otra vez, encontrando la frontera de carteras de mínimo riesgo, podemos fácilmente encontrar la de carteras eficientes.

En resumen, el teorema dice que podemos conocer ambas fronteras prácticamente por el precio de una. Además, se obtiene un panorma decisional muy completo ya que, se puede conocer el nivel de riesgo e incertidumbre que se tienen que aceptar para obtener un cierto rendimiento mínimo deseado y el rendimiento esperado asociado a cualquier variante de estos cuatro elementos.

También está en orden un comentario sobre los supuestos de los teoremas. Nótese primero, que el restringirse a la región.

$$\Omega = \{x \mid z(x) \geq 0;\ \mathbf{1}^T x = 1;\ x \geq 0\}$$

no es restrictivo en términos de la selección de una cartera de inversiones. Esto se debe a que, por principio de cuentas $\mathbb{1}^T x = 1$ y $x \geq 0$ -- son solamente las restricciones de PMR y PMI, que deben ser respetadas en cualquier caso. Más sujeto a discusión es tener que exigir $z(x) \geq 0$. Un poco de reflexión hace recordar que $z(x) < 0$ implica $Pr\{\mu < \alpha\} = \rho > \frac{1}{2}$, si $z(x) \sim N(0,1)$. Difícilmente un inversionista aceptará riesgos en que sus probabilidades de ganancia sean menores al 50%. Por lo tanto, los supuestos del primer teorema no parecen demasiado restrictivos.

En cuanto al segundo teorema, para la parte (i), exigir que $\beta \neq 0$ tampoco parece restrictivo. Esto se debe a que β es el multiplicador de Lagrange asociado a $x^T\mu = \gamma$ que es una restricción de estricta igualdad. Entonces, para que se requiera $\beta = 0$ se tienen que cumplir

a) las condiciones: $Vx^* = 0$; $\mu^T x^* = \gamma$ y $\mathbb{1}^T x^* = 1$. Pero esto es imposible, ya que las dos restricciones implican $x^* \neq 0$, y $Vx^* = 0$ con $x^* \neq 0$ sólo se da cuando $|V| = 0$ lo cual no es posible porque $V > 0$, ó

b) que $x^* \geq 0$ satisfaga $\mu^T x^* = \gamma$; $\mathbb{1}^T x^* = 1$ y $2Vx^* + \delta\mathbb{1} + \lambda = 0$; $\lambda^T x^* = 0$ para algún $\lambda \leq 0$ y δ irrestricto en signo. Si se premultiplica por x^* se obtiene: $2\sigma^2(x^*) + \delta\mathbb{1}^T x^* + \lambda^T x^* = 2\sigma^2(x^*) + \delta = 0$, es decir, -- $\delta = -2\sigma^2(x^*)$ lo cual no parece demasiado probable.

Además, en la parte (ii) exigir $\gamma \neq \alpha$ no es restrictivo ya que, como se indicó, difícilmente se concibe un inversionista que le interesan carteras con $\rho > \frac{1}{2}$.

Aquí cabe un último comentario sobre la solución de PMI y PMR. Como se indicó, PMI es un problema de programación cuadrática para el cual existen métodos muy eficientes de solución. Con la tecnología de cómputo existente es posible resolver problemas de varios cientos de variables (Véase [2] capítulo 11), en un número finito de iteraciones obteniendo los multiplicadores de Lagrange en el proceso.

En contrapartida, PMR puede ser más difícil de resolver, pero también está dentro de nuestras posibilidades. Dada la estructura del problema, es posible diseñar métodos eficientes, capaces de resolver problemas relativamente grandes (entre 100 y 200 variables) en unos cuantos segundos de tiempo de ordenador. (Véase [1, 10]).

BIBLIOGRAFIA

[1] Baranda M., F y Márquez D. Javier — "Sobre un Programa No-Lineal con una sola Restricción Lineal Relacionado con un Problema de Programación Estocástica." Nota Técnica No. 10. Unidad de Investigación y Desarrollo, Gerencia de Sistemas, Banco de México, S. A., Febrero 1976.

[2] Bazaraa, M. S. y C. M. Shetty — "Nonlinear Programming: Theory and Algorithms". Ed. John Wiley, 1979.

[3] Buser, S. A. — "Efficient Risk/Return Management in Commercial Banking". Jnl. of Bank Research. Vol. 10 No. 4 (invierno 1980).

[4] Cohen K. J. y F. S. Hammer — "Analitical Methods in Banking". Ed. Richard D. Irwin Inc. 1966.

[5] Hanssmann, F. S. — "Operations Research Techniques for Capital Investment". Ed. John Wiley, 1968.

[6] Hillier, F. S. "Derivation of Probabilistic Information for the Evaluation of Risky Investments." Man. Sci. Abril 1963. pp. 443-457.

[7] Hillier, F. S. "The Evaluation of Risky Interrelated Investments." Ed. North Holland. Pub. Co. 1969.

[8] Markowitz, H. M "Portfolio Selection" Jnl. of Finance Marzo de 1952.

[9] Markowitz, H. M. "Portfolio Selection. Efficient Diversification of Investments." Ed. John Wiley & Sons, 1959.

[10] Márquez, D., J. "Carteras de Inversión: Fundamentos Teóricos y Modelos de Selección Optima." Ed. Limusa, 1980.

[11] Sharpe, W. F. "Portfolio Theory and Capital Markets." - Ed. McGraw Hill, 1970.

[12] Tobin, J. A. "Liquidity Preference as Behaviour Towards Risk." Review of Economic Studies 25(1958) pp. 65-86.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA, U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

ANALISIS DE SENSIBILIDAD EN EL ESTUDIO DE CARRETERAS

-Aplicación de la Computación en Pavimentos-

M en C Rodolfo Téllez Gutiérrez

Noviembre, 1980.

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. Postal M-228

Dentro de las ramas de la ingeniería civil, pueden considerarse a las vías terrestres como fundamentales para el desarrollo de un país. Por los beneficios socioeconómicos que generan, la magnitud de la inversión que representan, el tiempo que deben mantenerse prestando un servicio adecuado, etc., es claramente palpable la importancia de su correcta planeación, diseño y construcción.

El diseño de pavimentos para carreteras y aeropistas involucra estudios complejos de suelos y materiales, su comportamiento bajo cargas y su habilidad para soportar el tránsito durante todas las condiciones climatológicas a lo largo de su vida de diseño útil.

El campo de diseño de los pavimentos debe ser dinámico conforme a la tecnología cambiante día con día y por los requerimientos impuestos por el creciente tráfico aéreo y carretero y las sobrecargas involucradas. En el pasado, la "regla del dedo" basada en experiencias previas gobernaba y tipificaba los diseños. Durante el período de 1920 a 1940, los ingenieros se concentraron en evaluar propiedades estructurales de los suelos, por lo que fué posible conseguir gran cantidad de información y datos que permitieron desarrollar teorías y modelos realísticos en el diseño de pavimentos.

Experimentos masivos a gran escala, como BATES, WASHO y AASHO, definieron los derroteros a seguir por muchos años resultando en mé-

todos usuales hasta la fecha. Sin embaro, esos métodos actuales de diseño no son considerados del todo adecuados. Son empíricos por naturaleza o no han sido implementados para usos generales. Debe recordarse aquí la complejidad del sistema de pavimentos. Concientes de ello, la investigación ha seguido su formato dinámico hasta llegar a las computadoras.

La ingeniería de sistemas está siendo aplicada a la solución de problemas e implementación de los actuales métodos de diseño y construcción. Los programas resultantes que han sido creados para estos fines permiten al ingeniero de diseño realizar un sistema de análisis detallado y preciso de la vida y comportamiento de un pavimento sobre cualquier período de diseño.

Obras de gran envergadura como carreteras y aeropuertos; no permiten reglas de dedo, recetas de proyectos tipos o soluciones al azar, dada la enorme inversión y beneficios que representan en todos conceptos. Si también se toma en cuenta la necesidad prioritaria de mantener y conservar la red carretera nacional existente con presupuestos limitados, la rehabilitación y conservación refuerzan la urgencia de "diseños efectivos". Las computadoras definitivamente son al presente, herramientas muy útiles para la correcta planeación, diseño y construcción de estas obras civiles.

Existen programas de computadora muy versátiles para pavimentos de caminos y aeropistas. Constantemente son experimentados y actualizados para cumplir con sus objetivos eficientemente. Los hay para sistemas múltiples de capas que sirven para estudiar con detalle esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles y rígidos. Estos programas permiten analizar cada capa componente de la estructura y también la consideración de cargas múltiples repetidas en el diseño. Predicciones de fatiga son analizadas con precisión.

El ingeniero de diseño debe tomar en cuenta los costos iniciales de construcción, de mantenimiento, intereses, amortización, etc. etc., para integrar un sistema de aproximadamente 50 variables básicas de entrada al programa. Entonces, con el auxilio de la computadora se obtendrían múltiples alternativas de diseño de entre las que se seleccionarán aquellas óptimas basadas en el costo mínimo.

No debe olvidarse la importancia del criterio y experiencia del ingeniero especialista al llevar a cabo los pasos previos al proceso de computación, contemplados en la "metodología mecanística" del sistema de pavimentos:

I) INVESTIGACION DE CAMPO
- pruebas no destructivas
- medición de deflexiones
- inventario de condiciones existentes
- muestreo de materiales

II) DETERMINACION EN LABORATORIO { propiedades elásticas de mats. obtenidos

III) ANALISIS DE LA CAPACIDAD DE CARGA DEL PAVIM. EXISTENTE

IV) EVALUACION DE LAS ESTRATEGIAS A SEGUIR PARA ALTERNATIVAS DE REHABILITACION Y REFUERZO.

Al finalizar este proceso, se estará en posibilidad de integrar valores adecuados para las múltiples variables que requiere la computadora para ejecutar el programa.

Antes de entrar al desarrollo general de los programas de computadora, su funcionamiento y puntos negativos, es conveniente mencionar una comparación subjetiva entre métodos de diseño empíricos y métodos de ingeniería de sistemas.

Me refiero a los métodos de diseño MS-11 y MS-11-A del Instituto del Asfalto de los EE.UU. El primero es un método empírico tradicional que no está del todo actualizado principalmente en cuanto a tipo y peso de aeronaves muy recientes (ej. Concorde). Por otro lado, está sujeto a errores de cálculo y apreciación por el número y complejidad de sus diagramas, aunado al tiempo excesivo de cálculo para obtener diseños.

El Instituto del Asfalto reconoció estas limitaciones y diseñó recientemente el programa de computadora MS-11-A para el diseño de pavimentos flexibles en aeropistas, que estando actualizado para todo tipo de aeronaves, cargas y operaciones, permiten al ingeniero obtener diferentes alternativas de diseño estructural, costos, rehabilitación programada, etc. en un tiempo mínimo de aprox. 30 segundos de ejecución del programa. Esto representa una ventaja adicional al poderse modificar valores numéricos y restrictivos para analizar diferentes condiciones de análisis y así obtener el diseño óptimo a un costo mínimo.

Ahora bien, debemos recordar que la computadora siendo una herramienta de mucha utilidad, a final de cuentas es una máquina compleja que estará sujeta al criterio y arbitrio del ingeniero diseñador por lo que se refiere a programación.

La programación requiere de reglas básicas a seguir y lenguajes sofisticados, por lo que el ingeniero debiera conocerlas para no cometer errores que por ejemplo, le lleven a un loop sin término, (infinite-loop), ó la no ejecución del programa por usar valores fuera de límite, ó a consumir un tiempo excesivo en la ejecución del programa (p.e.300 segundos). Es primordial la investigación cuidadosa de datos básicos para las variables de entrada al programa y el mantener actualizados los programas de computadora para diseño, conforme a la dinámica cambiante en esta tecnología y conforme a las necesidades particula-

res de cada obra.

Usualmente los programas de computadora para el diseño de pavimentos son ejecutados con una rutina principal y 8 subrutinas que realizan 5 funciones básicas:

1.- Lectura de datos básicos de entrada

2.- Solución de valores admisibles (p.e. tránsito)

3.- Solución de valores predecibles

4.- Determinación de espesores de diseño (alternativas)

5.- Determinación de requisitos para refuerzo o rehabilitación.

Existe primeramente una "interacción" lógica de datos básicos de entrada:

a) Variables de cargas

b) Variables climatológicas

c) Variables de caracterización materiales

d) Variables de construcción

e) Variables de diseño estructural

f) Variables de mantenimiento, etc.

Estas variables y su interacción lógica serán procesadas a través de un modelo estructural del pavimento que considerará respuestas primarias (deflexiones, deformaciones, esfuerzos, deterioro, etc) y respues

tas limitativas (ruptura, distorsión, desintegración, etc.)

Entre los procesos de respuestas primarias y limitativas, se analizan las propiedades de la sup. rodante a deslizamiento, rugosidad, tracción, etc. En el caso de aeropistas, a la altura de este nivel se procesan las variables restrictivas de ruido, polución y congestión.

Del modelo estructural básico o primario, se desprende otro submodelo que analiza criterios de decisión en base a la disponibilidad de — fondos, seguridad de operación, confort, costos de mantenimiento y de usuarios, que serán evaluados y sopesados para cada alternativa y junto con el resultado del primer modelo mecánico, se integrará para nuevo análisis y selección de alternativas, cuya combinación y selección serán impresas finalmente para su revisión y decisión.

Como ejemplo de aplicación práctico, se menciona el programa de computadora LVR (Low Volume Roads) para diseño de caminos revestidos y pavimentados de bajo costo y bajo volumen, que en su última versión maneja eficientemente 50 variables, que al ser procesadas durante la ejecución del programa en aprox. 22 segundos, se obtienen 40 alternativas de diseño basadas en costo mínimo, incluyendo costos finales y periodicidad y tipo de rehabilitación o refuerzo para cumplir perfectamente con la vida útil de diseño especificada.

Existen a la fecha un gran número de programas de computadora disponibles para el ingeniero de diseño en pavimentos rígidos o flexibles, para aeropuertos o caminos. Sin embargo, se tratarán aquí solo los más usuales y actualizados. Estos programas han sido experimentados con magníficos resultados en diferentes obras de gran envergadura como son los aeropuertos internacionales de O'Hare, en Chicago, USA, Dallas-Ft Worth, en Texas, Washington, D.C. y sistemas interestatales de los Estados Unidos y Brazil.

A continuación, se da un listado de programas disponibles y posteriormente se explica en términos generales sus aplicaciones y funcionamiento.

LISTADO DE PROGRAMAS DISPONIBLES

DENOMINACION	NOMBRE	FUNCION	PROYECTO/INSTITUCION
FPS-2	FLEXIBLE PAVEMENT SYSTEM	Diseñar sistemas de Pavimentos Flexibles	123 U.S. Dept. of Transp. CFHR, Univ. of Texas Austin Texas A M Univ. Texas Highway Depart.
LVR 1-11	LOW VOLUME ROADS	Diseño caminos revestidos y pavimentados flexibles para bajo volumen, de bajo costo.	60 U.S. Forest Service Depart. of Agriculture U. Texas at Austin C.A.T.S.
MS-11-A	COMPUTER PROGRAM FOR ASPHALT PAVEMENTS FOR AIR CARRIER AIRPORTS	Diseño de pavimentos flexibles para aeropuer	1973 The Asphalt Institute U.S.A.
RPS-2	RIGID PAVEMENT SYSTEM 2	Diseño de pavimentos rígidos de concreto hidráulico	123-21, 1974 Texas Transportation Institute Texas A M Univ. Univ. of Texas at Austin Texas Highway Department
TMA	TRAFFIC MIX ANALYSIS	Predicción de tráfico aéreo para el diseño de aeropistas y cargas equivalentes.	The Aspahalt Institute, U. S. A.
MODLAS 1-10	MODULUS OF ELASTICITY	Caracterización de materiales, analizando propiedades elásticas.	Center for Highway Research. Council for Advanced Transportation Studies
CRCP-1 CRCP-2	CONTINUOUSLY REINFORCED CONCRETE PAVEMENT	Diseño de pavimentos rígidos de concreto reforzado o armado continuo sin juntas, para aeropistas y carreteras.	177.- Center for Highway Research Austin Research Engs. Texas Highway Dept. FHWA

OMINACION	NOMBRE	FUNCION	PROYECTO/INSTITUCION
PLOT-2	DEFLECTION PROFILE	Análisis, recolección e impresión del contorno de deflexiones medidas continuas. Registro de condiciones existentes sobre la superficie de rodamiento.	Federal Highway Procedure "Design Procedure"
TVAL-2	STATISTICAL ANALYSIS	Análisis Estadístico de cualquier índole para estudio de datos iniciales, p.e. deflexiones medidas e inventario carreteras.	Statistical Analysis of Design Sections, FHWA " Design Procedure"
RPOD-1	RIGID PAVEMENT OVERLAY DESIGN	Diseño de refuerzos o sobrecarpetas para pavimentos rígidos.	77-66,67 FHWA, U.S.A.
RPOD-2	RIGID PAVEMENT OVERLAY DESIGN, UP-DATED	Diseño de refuerzos en pavimentos rígidos, considerando criterios por deflexiones, fatiga y grietas (predicción).	177-13 FHWA, U.S.A. Center for Highway Research Texas Highway Depart.
RFLCR-1	REFLECTION CRACKING PROGRAM	Procedimiento Racional de evaluación grietas y grietas reflejadas en sobrecarpetas.	177-13-1 Center for Highway Research.
SLAB-30	SLAB ANALYSIS	Programas de diseño y análisis, empleando teoría elástica para múltiples capas de pavimentos para carreteras y aeropistas Criterios de falla, esfuerzos-deformación y predicciones son procesadas aquí.	Transportation Facilities Branch, Department of the Army, U.S.A.
SLAB-49	SLAB ANALYSIS		
ELSYM-5	ELASTIC SYSTEM ANALYSIS LAYERED		Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California U.S.A.
SHELL BISTRO	MULTI LAYERED ELASTIC SYSTEM ANALYSIS MLESA		Shell Oil Company, U.S.A.

PROGRAMAS DE APOYO A LOS ANTERIORES

DENOMINACION	NOMBRE	FUNCION	PROYECTO/INSTITUCION
ACAP-1 ACAP-2	Airport Capacity Analysis Airport Capacity Analysis	Analisis y Diseño Capacidad en base al tráfico aéreo de aeropuertos	University of Texas at Austin CFHR CATS
GEOPRO SIMPRO TEXAS MODEL	A Geometric Processor Simulator Process Texas Model	Tráfico y su análisis para intersecciones de carreteras y urbanas.	Texas Highway Dept. F A A FHWA

Es importante hacer notar el tipo de computadora que pueda ejecutar - los programas a continuación enlistados; esto es,

C D C	6000
C D C	6400
C D C	6600
I B M	360
I B M	370
UNIVAC	1108

Usualmente cada programa es diseñado en un específico lenguaje — (p.e. Fortran V) y para un tipo o modelo de computadora (p.e. CDC-6600). Por supuesto haciendo las modificaciones necesarias se puede convertir el sistema para procesarse en diferente computadora, - pero existe el inconveniente de incremento o reducción del tiempo - para ejecución del programa. Caso específico: el programa LVR-11 está diseñado para procesarse en computadora CDC-6600, que es - la más rápida a la fecha. Al ejecutarse los cambios a IBM-360, el mismo programa tarda de 4 a 5 veces más su tiempo de ejecución, - lo que deberá considerarse para fines de "costo/tiempo/ejecución".

FPS 2 FLEXIBLE PAVEMENT SYSTEM 2

El programa de computadora para sistemas de pavimentos flexibles - No. 2, auxilia a los ingenieros de diseño para entender los efectos de las diferentes variables que intervienen en el diseño de un pavimento del tipo flexible de una manera más eficiente.

Está basado en el criterio de diseño por deflexiones, las cuales son obtenidas en el campo a través de empleo de equipos de evaluación tales como Dynaflect y Viga Benkelman.

Los valores obtenidos de deflexiones en los diferentes tramos seleccionados junto con datos de tránsito para ejes equivalentes, factores de clima, resistencia de los materiales por emplear, etc. esto es, - variables de diseño, de limitaciones, junto con variables de costos, totalizan 45 diferentes tipos de datos básicos de entrada para resolver el programa y obtener de una manera eficiente, rápida y precisa diferentes alternativas de diseño de la estructura total del pavimento flexible y sus costos respectivos.

Se obtienen además, dentro del período de diseño de vida útil del - pavimento, el número y tiempo a efectuar de refuerzos necesarios para asegurar metas de duración de la estructura.

Listado:

Proyecto Investigación 1-8-69-123

1 9 7 2

U.S. DOT

Texas Highway Department

Texas AEM (TTI)

University of Texas at Austin

(CFHR)

LVR, LVR 11 LOW VOLUME ROADS

El diseño de pavimentos de bajo costo y para bajos volúmenes de tránsito es un procedimiento complejo que involucra numerosas variables. La complejidad de interacción entre ellas se ha ido solucionando gracias a mejores informaciones de campo y a programas de computadora tales como el "LVR" "Caminos de bajo volumen".

Desde su creación en 1974 se ha ido mejorando y modificando, hasta llegar a la versión "LVR-11", de enero 1979, considerada como uno de los programas óptimos para diseño de carreteras económicas.

En términos generales, este programa de computadora puede ser utilizado para calcular los diseños más económicos y favorables para pavimentos con carpeta asfáltica.

Pero además, este programa está diseñado para resolver caminos revestidos con grava que cumplen con ciertos requerimientos especificados por el ingeniero diseñador. Como ejemplo de estos requisitos pudieramos mencionar la vida de diseño deseada, restricciones referentes a costo inicial de construcción, frecuencia de las rehabilitaciones, etc.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS

TOMA DE DECISIONES BAJO MULTIPLES OBJETIVOS: UNA CRITICA DEL ESTADO DEL ARTE

DR. JORGE DIAZ PADILLA

NOVIEMBRE, 1980

cio de Mi 'a Calle de Tac ' 5 primer piso México 1, D. F. Tel: 521-40-20 Apdo. F 'al M-2285

TOMA DE DECISIONES BAJO MULTIPLES OBJETIVOS: UNA CRITICA DEL ESTADO DEL ARTE

por el

DR. JORGE DIAZ PADILLA

PRESENTADO ANTE LA ACADEMIA MEXICANA DE INGENIERIA

NOVIEMBRE, 1978

TOMA DE DECISIONES BAJO MULTIPLES OBJETIVOS: UNA CRITICA DEL ESTADO DEL ARTE

Jorge Díaz Padilla

RESUMEN

Se hace la descripción de un modelo de decisiones públicas bajo objetivos múltiples y condiciones de incertidumbre, identificándose sus principales componentes (decisores, objetivos, atributos, preferencias, riesgo e incertidumbre), y discutiéndose sus interrelaciones.

En seguida se discuten las técnicas disponibles para definir y modelar los componentes del problema, estableciéndose sus alcances y limitaciones, y concluyéndose sobre la clase de problemas que es factible resolver con dichas herramientas.

Finalmente, se establece que para el caso de un decisor, o de un grupo "homogéneo" de decisores, es posible definir una función de utilidades multidimensional sobre un conjunto de atributos y emplear dicha función en el proceso de toma de decisiones bajo objetivos múltiples. Sin embargo, también se concluye que la agregación de varias funciones de utilidad del tipo anterior no redundan en un modelo válido para representar el comportamiento de grupos de decisores en conflicto, y que por lo tanto, en este caso, es necesario recurrir a un proceso político para realizar negociaciones y finalmente llegar a una solución.

I

DEFINICION DEL PROBLEMA

1.1 INTRODUCCION

En este trabajo se entenderá por *Toma de Decisiones* el proceso de análisis, síntesis y selección de cursos de acción (alternativas) desde un punto de vista *prescriptivo*. Por otra parte, la discusión se centra en la toma de *decisiones públicas*, bajo condiciones de incertidumbre y en un contexto de objetivos múltiples.

El caracter público que define a los problemas de interés se refiere a considerar aquellas alternativas cuya implantación podría afectar, de alguna manera, a diferentes grupos o sectores de la población (presentes o futuros). Es decir, el "circulo de clientes" se alarga de manera importante, y comprende a todas aquellas personas que se verían afectadas (positiva o negativamente) con la selección y puesta en marcha de alguno de los cursos de acción contendientes, y que tienen derecho a participar en el proceso decisional, cuando menos a nivel de que sus opiniones y puntos de vista sean tomados en cuenta.

Las alternativas consideradas generan consecuencias inciertas y de naturaleza distinta, las cuales permitirán definir su efectividad para maximizar un conjunto de objetivos en conflicto. Finalmente, es importante enfatizar el

hecho de que en las discusiones que siguen se adopta un enfoque netamente prescriptivo, en contraposición con un análisis de tipo descriptivo dirigido a estudiar el comportamiento que ha gobernado la toma de decisiones en el pasado, o a una teoría positiva (normativa) "diseñada para seres superracionales y ficticios[1]". Por lo tanto, serán de interés únicamente aquellas metodologías que estén dirigidas a señalar cómo estructurar ordenadamente el problema y en que forma definir sus componentes.

A continuación se presenta una definición formal del problema anterior, identificándose sus principales subsistemas y analizándose sus interacciones. En seguida se discuten los alcances y limitaciones de los modelos empleados para representar a los componentes del problema, y finalmente se establece tanto el estado del arte en la actualidad, como su posible desarrollo a futuro, de las técnicas de toma de decisiones con multiobjetivos para problemas públicos.

---

1 Raiffa, H., *Decision Analysis*, Addison-Wesley, 1968.

1.2 EL PROBLEMA DECISIONAL

Conceptualmente, el problema esquematizado en la sección anterior se puede resolver por medio de un modelo matemático como el siguiente:

$$\max_{I} \{ E[U^{I}(\underline{X})] = \int_{R_n} U(\underline{x}) f^{I}_{\underline{X}}(\underline{x})\, d\underline{x} \}$$

cuya solución corresponde a la alternativa (seleccionada entre "I" bajo estudio) que maximice el valor esperado de la función de utilidades del grupo decisor, $U(\cdot)$, en un espacio Euclideano de n dimensiones[1].

Una vez especificado un conjunto de *objetivos* relevantes para el problema en estudio, se definen "n" *atributos* $X_1, X_2, \ldots\ldots, X_n$, los cuales permitirán *medir* el nivel que se lograría de cada uno de los objetivos anteriores con las alterantivas de solución. En este sentido, los objetivos indican las "direcciones" en que es necesario moverse para lograr los impactos más adecuados, y los atributos definen escalas (medidas de efectividad) que permiten transformar en términos cuantitativos a la naturaleza abstracta de las consecuencias resultantes para cada alternativa.

Si x_i denota un nivel específico del atributo X_i, y la función de utilidades del j-ésimo decisor definida sobre dicho atributo, $u_{ji}(x_i)$, se construye de acuerdo a ciertas reglas, resulta que el valor esperado de dicha función puede

---

1 Aunque existen otras formulaciones del problema, en este trabajo se adoptó un enfoque basado en la Teoría de Utilidades el cual, a juicio del autor, ha probado ser el más útil en la práctica ya que permite incorporar formalmente en los análisis a los aspectos de riesgo e incertidumbre, sin los cuales no es posible modelar adecuadamente el proceso humano de análisis y síntesis de alternativas.

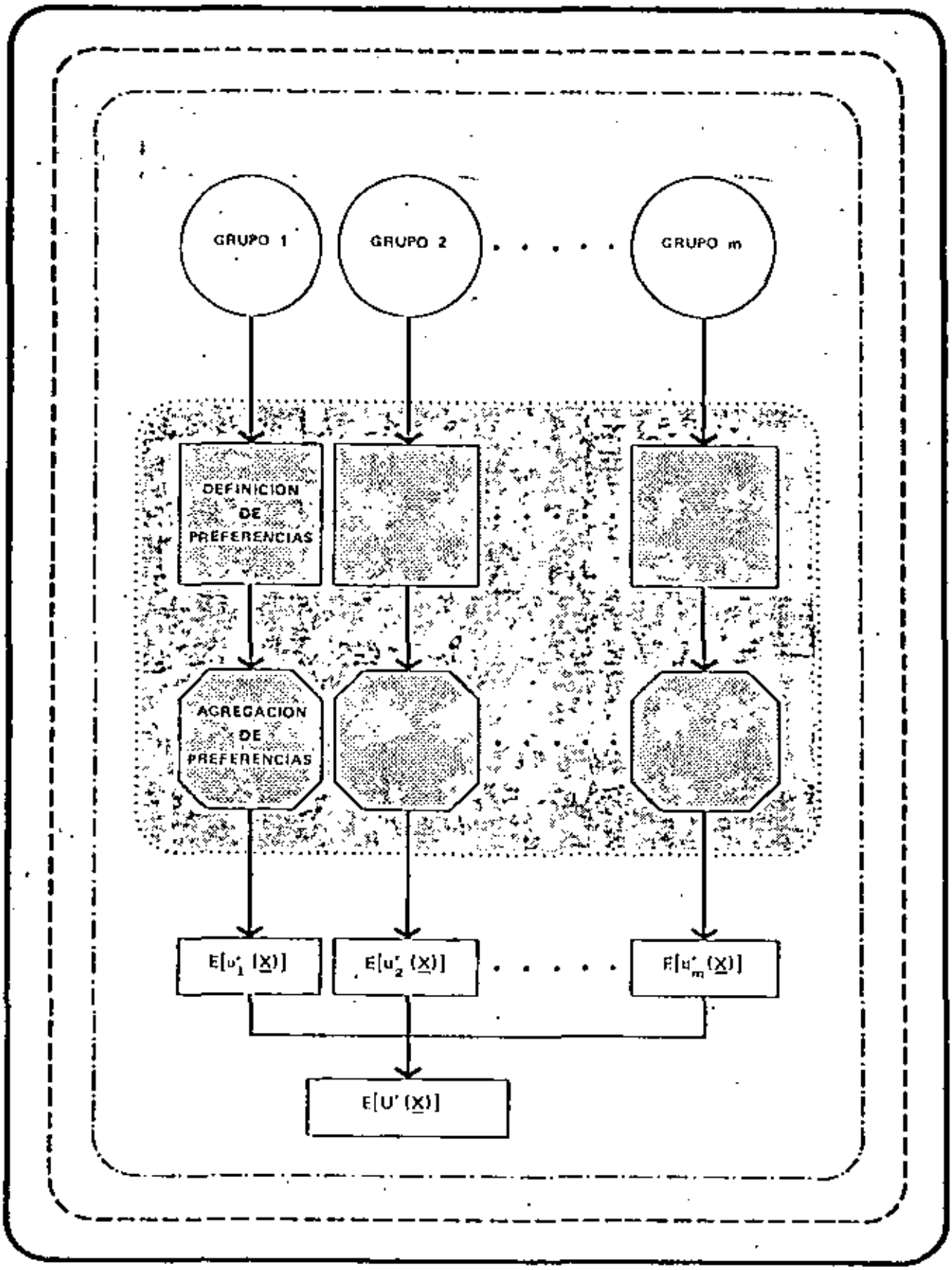
emplearse como un criterio apropiado para comparar y seleccionar alternativas de manera consistente[1]. En base a las funciones de utilidad marginales definidas por todos los decisores sobre todos los atributos ($\underline{X}$), se establece una función global, $U(\underline{X})$, la cual refleja la estructura de preferencias del grupo decisor y toma en cuenta aspectos tales como: actitud ante el riesgo y estructura de preferencias de cada decisor, transacciones y preferencias intergrupales, etc. La función $f^{1}_{\underline{X}}(\underline{x})$, por otro lado, representa la función de densidad de probabilidades (conjunta) de las consecuencias generadas por la alternativa "1".

En resumen, el problema decisional se reduce a la definición de 2 funciones en n-dimensiones: una sobre las estructuras de preferencias de los decisores, y otra sobre el comportamiento aleatorio de los impactos de las alternativas. Vale la pena hacer notar que dichas funciones se estiman en forma independiente ya que la primera depende exclusivamente de las características preferenciales del grupo decisor, mientras que la segunda es resultado de estimaciones hechas por "expertos" quienes pueden o no estar facultados para tomar decisiones.

En la Fig. 1 se indica esquemáticamente el análisis de una de las alternativas, en donde se muestra un procedimiento ligeramente diferente al descrito ya que aquí se hace primero el cálculo de los valores esperados de las funciones de utilidades de cada decisor, $E[u_j(\underline{X})]$, para posteriormente combinarlos en un valor esperado global $E\{U(\underline{X})\}$ (como se verá más adelante, esta secuencia de cálculos es mucho más conveniente para fines prácticos ya que permite la descomposición del problema). Por otro lado, haciendo referencia a la misma

---

1 von Neumann, J. y O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*, 2a. ed., Princeton University Press, 1947.
Savage, L. J., *The Foundations of Statistics*, John Wiley and Sons, 1954.



DECISORES — ATRIBUTOS

OBJETIVOS — INCERTIDUMBRE

FIG. 1 ANALISIS DE LA ALTERNATIVA a': CASO DE m DECISORES

figura, el "módulo de preferencias" a su vez se dividió en 2 partes: la definición de preferencias individuales por atributo, y la agregación de dichas preferencias por individuo o grupo decisor. Finalmente, el "módulo de incertidumbre" se indica rodeando al anterior (de manera punteada) para hacer resaltar el hecho de que este es exógeno a los grupos decisores y depende de las características probabilísticas de las alternativas en consideración.

II

DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

2.1 INTRODUCCION

En el problema descrito anteriormente se identifican varios componentes para los cuales resulta fundamental contar con modelos que los puedan representar adecuadamente y sirvan para describir el acoplamiento y las interacciones de los subsistemas reales.

A continuación se discuten algunos de los problemas que se tienen para la formulación de dichos modelos, y se mencionan las metodologías que se emplean actualmente en diferentes etapas del proceso.

2.2 OBJETIVOS Y ATRIBUTOS

El análisis formal de un problema de decisión complejo como el definido al inicio de este trabajo requiere de la definición explícita de los objetivos que se pretenden lograr con la selección e implantación de alguna de las alternativas analizadas, así como de los atributos que servirán para medir el grado con que se lograrán dichos objetivos.

En la práctica, esta etapa del problema es particularmente crítica ya que por lo general no se tiene un consenso en la definición de objetivos para la comunidad, los cuales frecuentemente son definidos por funcionarios o representantes públicos, quienes tratan de explicitar sus propias

interpretaciones de conceptos tan imprecisos y ambiguos tales como "bienestar de la sociedad" o "calidad de la vida".

Resulta evidente que si los objetivos no se tienen claros, la especificación de atributos comprensibles y medibles que sirvan para "traducirlos en lenguaje cuantitativo" puede conducir al planteamiento y solución de problemas equivocados.

Actualmente se tienen ciertas guías y lineamientos para la generación de objetivos y su estructuración ordenada en base a procedimientos de jerarquización[1]; sin embargo, dichas metodologías, aunque facilitan esta etapa del análisis, necesitan profundizarse y formalizarse pues hasta la fecha aun falta mucho por hacer en esta dirección.

2.3 ESTRUCTURACION DE PREFERENCIAS

El concepto de utilidad unidimensional para la cuantificación y estructuración de preferencias individuales se ha estudiado formalmente desde la década de los 50's, y de manera muy intensa durante los últimos 15 años[2]. Actualmente se dispone de la teoría necesaria para hacer operacional y útil el concepto de utilidad, y se cuenta con procedimientos pragmáticos para estimar funciones de utilidad unidimensionales, revisar su consistencia y estimar su validez.

---

1 Miller, J. R., *Professional Decision Making*, Praeger Publishers, N. Y., 1970. Ellis, H. M., *The Application of Decision Analysis to the Problem of Choosing an Air Pollution Control Program for New York City*, Tesis Doctoral, U. de Harvard, 1970.

2 Ver por ejemplo, Pratt J. W., H. Raiffa y R. O. Schlaifer, *Introduction to Statistical Decision Theory*, McGraw-Hill, N. Y., 1965.

Sin embargo, la estimación de funciones de utilidad en mas de una dimensión se encuentra aun en estado incipiente, requiriéndose profundizar la investigación en el área de utilidades condicionales así como en el desarrollo de métodos prácticos para analizar los efectos de depedencia entre atributos, y realizar la estimación directa de funciones de utilidad multidimensionales.

2.4 AGREGACION DE PREFERENCIAS

Aprovechando que la Teoría Unidimensional de Utilidades permite establecer rápida y confiablemente funciones de preferencias de tipo marginal, durante los últimos 10 años se ha estado estudiando cómo emplear dichas funciones para construir funciones de utilidad n-dimensionales[1].

En este sentido, el aspecto fundamental lo constituye el nivel de dependencia que exista entre las estructuras de preferencias de los diferentes atributos, habiéndose logrado, a la fecha, resultados generales únicamente para los casos de independencia mutua y preferencial[2].

En la Fig. 2 se indican los modelos empleados para la agregación de preferencias bajo las hipótesis anteriores, debiéndose hacer énfasis en que la función de utilidades resultante, $u_j(\underline{x})$, aunque multidimensional en el contexto de atributos, continúa definida en una dimensión en lo que respecta al número de participantes en la decisión.

---

1 Keeney, R. L., y H. Raiffa, *Decisions with Multiple Objectives*, John Wiley & Sons, 1976.

2 Keeney, R. L., *Multiplicative Utility Functions*, Operations Research, 22, 1974.

I Utilidades Mutuamente Independientes

$$k_j u_j(x) + 1 = \prod_{i=1}^{n} [k_j k_{ji} u_{ji}(x_i) + 1]$$

II Utilidades Mutua y Preferencialmente Independientes

$$u_j(x) = \sum_{i=1}^{n} k_{ji} u_{ji}(x_i)$$

FIG. 2 MODELOS DE AGREGACION DE PREFERENCIAS

Las aplicaciones desarrolladas a la fecha en el campo del análisis de decisiones con objetivos múltiples se apoyan, de alguna u otra manera, en las hipótesis de independencia anteriores. Se establece que los modelos del tipo indicado en la Fig. 2 son adecuados para especificar una representación "razonable" de las preferencias de un decisor, y que si las hipótesis de independencia no se cumplen puede recurrirse a técnicas de transformación de los atributos con el objeto de poder explotar estructuras algebráicas como las indicadas arriba. En este sentido, vale la pena mencionar que el uso indiscriminado de modelos como los anteriores puede conducir a representaciones erróneas de las estructuras de preferencias y por lo tanto a resultados equivocados. Sin embargo, modelos sencillos del tipo anterior pueden emplearse como representaciones aproximadas de la realidad siempre y cuando se desarrollen simultáneamente análisis de sensibilidad* dirigidos a establecer la validez de los resultados.

---

* Para esto se recomiendan análisis similares a los empleados en la formulación de modelos probabilísticos, en donde debido a la dificultad de estimar adecuadamente la estructura de dependencia estocástica en conjuntos de variables aleatorias se recurre a hipótesis tanto de dependencia perfecta como de independencia y se analizan sus efectos en los resultados obtenidos.

2.5 INCERTIDUMBRE

La solución del problema de decisión bajo incertidumbre requiere balancear las preferencias o utilidades con las estimaciones de las consecuencias inciertas generadas por cada alternativa. Este último aspecto ha sido tratado ampliamente[1] en su representación unidimensional, tanto en el campo de las Ciencias Sociales como en el área de la Estadística y la Investigación de Operaciones.

El problema multidimensional presenta dificultades similares a las que se tienen para el cálculo de funciones de utilidad, por lo cual también aquí se recurre a hipótesis de independencia, en este caso para el comportamiento aleatorio de las variables en cuestión.

Vale la pena no perder de vista el hecho de que se necesitan tantas funciones de probabilidad como alternativas se estén analizando ya que las características aleatorias de las consecuencias son condicionales a dichas alternativas[2].

2.6 DECISIONES EN GRUPO

Uno de los principales problemas en la toma de decisiones públicas es que en muchos de los casos la identidad de los "clientes" no está clara[3], por lo cual, aunque fuera factible y conveniente tomarlos en cuenta dentro del proceso decisional, no es posible hacerlo.

1- Kyburg, H. E., y H. E. Smokler (eds.), *Studies in Subjective Probability*, John Wiley and Sons, N.-Y., 1964.

2 de Neufville, R. y R. L. Keeney, *Use of Decision Analysis in Airport Development for Mexico City*, Analysis of Public Systems, A. W. Drake, R. L. Keeney, y P. M. Morse (eds.), MIT Press, 1972.

3 Liebman, J. C., *Some Simple-Minded Observations on the Role of Optimization in Public Systems Decision-Making*, Interfaces, Ago. 1976.

Adicionalmente a la restricción anterior, en la actualidad no se dispone de metodologías que permitan definir en la práctica a la estructura de preferencias de un grupo decisor. En la Fig. 1 se presenta el análisis de una alternativa descompuesta en "m" subproblemas cuyas soluciones parciales se acoplan como último paso del algoritmo. Si cada uno de los "m" grupos se puede visualizar como un conjunto de individuos que *no tienen autoridad en la toma de decisiones* pero cuyos puntos de vista son tomados en cuenta a través de un "Super-Decisor Benévolo" quien funciona como sintetizador de los sentimientos y preferencias de los miembros del grupo, la función de utilidades intergrupal (calculada en base a reglas definidas por dicho Super Decisor*) puede construirse a partir del conjunto de funciones de utilidad individuales[1].

Desde el punto de vista práctico las complicaciones surgen al ser necesario contar con las funciones de utilidad de cada uno de los miembros del grupo, ya que deseará diseñar este último lo más numeroso posible con el objeto de maximizar su representatividad. Por otro lado, si los miembros de dicho grupo pertenecen a un mismo sector de la población beneficiada (o afectada) y tienen preferencias estructuralmente homogéneas con respecto a las consecuencias generadas por cada alternativa**, es factible definir una función de utilidades para el grupo que sea un modelo adecuado y útil para la toma de decisiones.

Si bien en algunos casos el cálculo de las utilidades esperadas para cada grupo, $E[u_j(\underline{X})]$, se puede hacer con un nivel de confiabilidad razonable, la combinación de dichos indicadores en uno solo que refleje los puntos de vista conflictivos de los diferentes grupos involucrados (donde unos ganan y otros pierden) presenta dificultades prácticamente insalvables.

---

* Como por ejemplo: quienes pueden pertenecer al grupo, cuantos individuos integran el grupo, etc.

** Esto es equivalente a tomar una muestra estadística de una población homogénea con objeto de mejorar la confiabilidad de la estimación de parámetros. Se tien procedimientos similares para definir la distribución de probabilidades de un grupo en base a la agregación de distribuciones individuales (ver Raiffa (1968), *op. cit.*).

1 Fishburn, P. C., *The Theory of Social Choice*, Princeton University Press, 1973.

El problema del "Grupo de Participantes", en donde un conjunto de individuos *comparten colectivamente la responsabilidad de tomar una decisión* no tiene solución sin hacer comparaciones interpersonales entre las preferencias de cada individuo[1]. Por otro lado, en el campo de la Economía del Bienestar está demostrado que *La Función de Utilidades de un Grupo Humano* depende (de una manera no conocida) de las bases éticas, morales y psicológicas de los individuos que constituyen dicho grupo, y que por lo tanto no es posible su obtención[2]. En este sentido, el cálculo de la función global U(X) reviste un interés meramente académico y su utilidad se encuentra en el campo teórico del estudio del comportamiento humano.

---

1 Arrow, K. J., *Social Choice and Individual Values*, John Wiley & Sons, N.Y., 1951.

2 Little, I. M., *A Critique of Welfare Economics*, 2a. ed., Oxford University Press, 1960.

Aunque la construcción de modelos adecuados para representar dicho proceso presentan dificultades importantes, en la actualidad ya es factible desarrollar análisis de tipo formal que incorporan elementos subjetivos tanto de preferencias como de incertidumbre y permiten tomar en cuenta la naturaleza no-lineal, no-aditiva y multidimensional de la función de utilidades de un individuo.

Como se discutió anteriormente, el estado del arte permite formular modelos de decisión aplicables a personas (o grupos homogéneos) que se enfrentan a problemas complejos, con múltiples objetivos en conflicto y bajo condiciones de incertidumbre. Sin embargo, aceptando que en la toma de decisiones públicas deben intervenir los diferentes grupos beneficiados o afectados, se concluye que *las técnicas actuales no son las adecuadas* para resolver este tipo de problemas.

Las metodologías disponibles serán útiles para explorar las actitudes de los grupos involucrados y explicitar su interpretación, tanto de los componentes del problema como de sus interacciones. Posiblemente después deberá emplearse un proceso de tipo político para alcanzarse un compromiso y una solución. Sin embargo, aunque en este campo prácticamente no se tiene experiencia, se nota inquietud en esa dirección, buscándose maneras para incorporar a la comunidad en el proceso decisional, incluyendo la fase de definición de objetivos.

En resumen, si bien el caso para un decisor se tiene bastante desarrollado y actualmente se están haciendo aplicaciones en muchas áreas* (sistemas de transporte, localización de plantas nucleares, sistemas hidráulicos regionales, ecosistemas, problemas ambientales, etc.), la aceptación en la práctica e

---

* En este sentido, debe hacerse especial mención de los trabajos desarrollados en el "International Institute for Applied Systems Analysis" (IIASA) durante el período 1974-1976.

Directorio de Alumnos del curso: Fundamentos y Aplicaciones de la Ingeniería de Sistemas Noviembre-Diciembre 1980.

1. Armando Arcos Millán

2. Nancy Aricraga Rodríguez
Depto. de Investigación y Desarrollo de Técnicas
Corregidora 8-2°
Z.P.1
782 10 99

Calle 22 # 15-4
Sn. P. de los Pinos
Z.P. 18
598 68 43

3. Efraín Alquicira López
DECRISH
Insurgentes Sur 32
México, D.F.
591 18 35

Rubirasa 33
Santiago Tepalcatlapa
México 23, D.F.

4. Jorge Alberto Aguilar López
I M P
Lázaro Cárdenas 157
Z.P. 14
567 66 00 Ext. 2684

Río Lerma 94-8
ZP.5
525 37 94

5. Santiago Andrade Lázaro
SARH
Reforma 35-10 °
Z.P.4
592 33 24

6. Gabriel Alvarez Cervantes
SARH
Insurgentes Sur 30-32
México, D.F.
591 18 35

Sur 8 # 143-1
Col. Oriental
Z.O. 9

7. Joaquín Arellano Núñez
SARH

8. Héctor J. Arrona Urrea
Centro de Cálculo
Facultad de Ingeniería, UNAM
México 20, D.F.
768 06 62

Fco. Morazán 219-3
Col. M. Balbuena
Z.P. 9

9. José L. Ayala Salazar
SARH

10. Ramón Barajas Chavarría
SARH
Reforma 107-10 °
Z.P. 4
535 71 77

11. Alfonso Beltrán Arizmendi
I M P
Av. de los 100 metros No. 152
México 14, D.F.
567 66 00 Ext. 2114

Av. Nte. IPN 401 "D"
Col. Linda vista
Z.P.14

12. Octavio Castellanos López
SARH
Sn. Bernabé 549
Z.P.20
595 24 55

Av. Copilco 162 Edif. 27-301
Z.P.20
550 88 72

13. Esteban Corona Escamilla
Av. 20 de Nov. No. 12 Sn. Sebastián Xhala
Cuautitlán de R. R., Edo. de Méx.

14. Humberto Corral García
S A R H
Reforma 107-10° Piso
Z.P.4
548 58 42

Av. Universidad 1900 Edif. 3 -201
Col. Oxtopulco
Z.P.20
548 58 42

15. Cruz Alejandro Cruz Hernández
INFONAVIT
Bca. del Mto. 280
Z.P.20
524 52 33

Pavo Real Real 20
Mayorazgos del Bosque
Atizapán de Zaragoza, Edo. de Méx.
3 79 44 83

16. Daniel Díaz Alatriste

17. M. Leticia Dueñas Donnadieu
SAHOP
Vértiz 1243
Z.P.12
590 50 86

Calle Nardos Mna. 43 Lote 10
El Rosario
México, D.F.
559 98 53

18. Juan José Galván Vázquez
SARH
Plaza de la Rép. 31-5°
Z.P. 1
591 15 94

Antonio Caso 34-13
Z.P.4
592 51 67

19. Jorge García Camacho

20. Lorenzo García Cordero
Constructora y Urbanizadora Cur, S.A.
Av. Nvo. León 144 Entrepiso
Z.P.11
553 13 22

Sta. Margarita 112 Bis
Col. del Valle
Z.P.12
523 05 72

21. Gustavo Hernández García
I M P
Lázaro Cárdenas 152
Z.P.14
567 66. 00 Ext. 2684

Río Tigris 42-12
Z.P.5
528 57 45

22. Víctor Manuel Hernández González
SPI Ingenieros, S.A. de C.V.
Melchor Ocampo 445
Z.P. 5
525 02 90

Sur 111 # 635
Sector Popular
Z.P. 13

23. Víctor M. Islas Rivera
ISTME S.A.
Legaría 252 Col. Argentina
México, D.F.
399 69 22

Amado Panlagua 42-1
Col. Moctezuma
Z.P.9

24. Juan Alejandro Jiménez García
Centro de Cálculo
Fac. de Ing.
UNAM
Z.p.20
550 52 15 Ext. 4150

Ixcateopan 62-201
Z.P.12
575 70 31

25. Carlos Langle de Anda
Cía. de Luz y Fza. del Centro, S.A.
Playa Pie de la Cuesta 273
Z.P.13
532 91 66

26. Rolando Machicao Alborta
S H C P
Jefe de Proyectos
Depto. de Informatica
Z.P.1
585 23 91

Retorno 9 # 9 Altos de I. Zaragoza
Jardín Balbuena
Z.P. 9
762 36 52

27. Francisco Javier Maytorena Fontes
S A R H
Reforma 107-5°
Z.P. 4
566 06 88 Ext.122

Sur 69 # 3036-5
Col. V.Piedad
Z.P. 13
530 11 87

28. Manuel Meza Campi
IMP

Río Nazas 167
Z.P.5
533 44 36

29. Emilio Molina Ochoa

40. David Paredes Herrera
SAHOP
Eje Central 726
Portales
Z.P.13
539 60 64

41. José Luis Patiño García
Centros de Integración Juvenil, A.C.
José.Ma. Olloqui 48
Z.P.13
534 34 34

Playa Sur 14-7
Col. Marte
Z.P. 13

42. Jorge R. Pazmiño Urquizo
I M P
Av. Lázaro Cárdenas 152
México 12, D. F.
567 66 00 Ext. 2684

Av. Insurgentes Sur 4411-22-304
Tlalpán
Z.P.22
573 85 50

43. Arturo Pizano Navarro
S H C
Izazaga 89
Z.P. 1
583 23 91

F. Xicotencatl 27
Satélite
Naucalpan, Edo. de Méx.
562 76 78

44. Alejandro Ramírez Flores
Cía. de Luz y Fza. del Centro, S.A.
Melchor Ocampo 171-407
Z.P.17
592 07 65

Canarías 986-303
Z.P.13
672 0158

45. Arturo Rodríguez Córdova

46. Manuel Romero Beltrán

47. J. Alfredo Ruelas Romo
SARH
Reforma 46
Z.P. 1

Av. Morelos 119 Edif. 6 Depto. 1
Naucalpan, Edo. de Méx.

48. Teodoro Sánchez García
ENEP ACATLAN
Naulcalpán, Edo. de Méx.
373 23 99

Mineros 62-5
Col. Morelos
Z.P.2

49. Guillermo Sánchez Pérez
Cía. de Luzy Fza. del Centro, S.A.
Playa Pie de la Cuesta 273
Z.P.13
672 56 95

Gabino Barrera 113-6
Col. Sn. Rafael
Z.P.4
591 1784

50. Miguel Saucedo Cisneros
SARH
Coordinación General de Desarrollo Agroindustrial
Av. Río Churubusco 650
Z.P.8
650 03 20

Torres Adalid 1710-8
Z.P.12
536 61 21

51. Eduardo Solís López
SARH
Dir. Gral. de Protección y Ordenación Ecológica

52. Alonso Sordo Veraza
Centros de Integración Juveniles
José Ma. Olloqui 48
Z.P.12
534 84 39

Allende 8
Tlalpán
Z.P.22
573 77 88