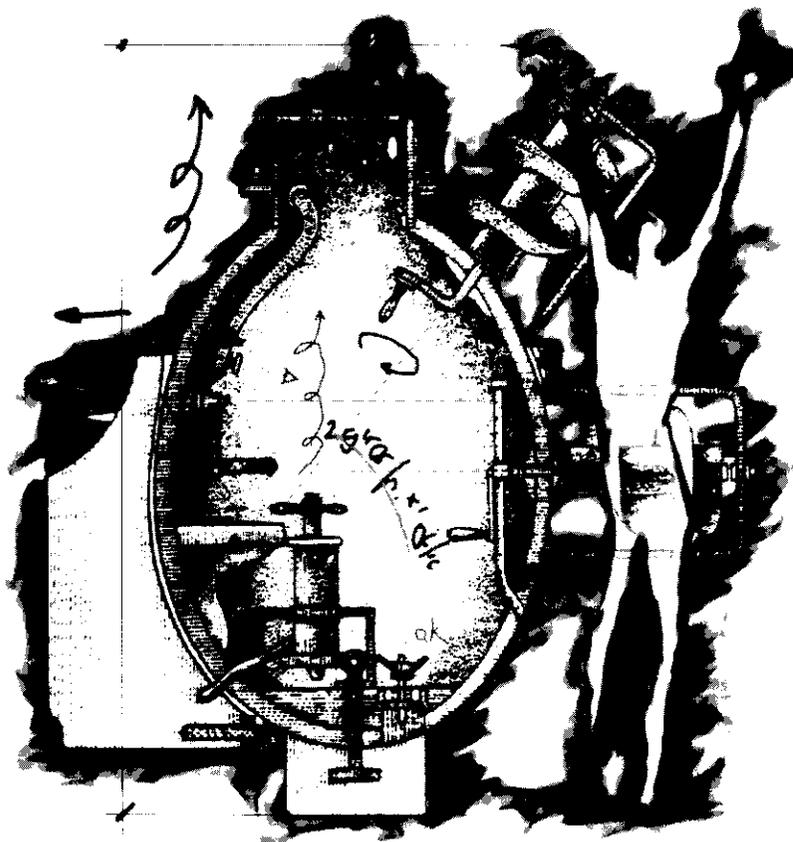


DINÁMICA DE SISTEMAS APLICADA

por

Donald R. Drew



Isdefe

4



Donald R. Drew

Tiene más de 10 años de experiencia como ingeniero de diseño y proyectos, y más de 30 como profesor de ingeniería de sistemas.

Ha dirigido programas de ingeniería de sistemas en la Universidad de Texas, en el Instituto Tecnológico Asiático, en la Universidad de Australia Occidental, en la Universidad Norteamericana en Beirut y en la Universidad Estatal y el Instituto Politécnico de Virginia, donde actualmente es el W. Thomas Rice Professor de Ingeniería y el Coordinador de la División de Ingeniería de Transporte.

Ha dirigido proyectos de investigación por valor de más de 1000 millones de pesetas, trabajando para la NASA, el Departamento de Defensa, el Centro de Análisis Navales, el Mando Aéreo Naval y el Centro de Guerra Naval de Superficie, entre otros.

Es autor de dos libros, co-autor de otros cuatro y ha presentado un total de más de 200 trabajos y artículos en 40 países.

ILUSTRACIÓN DE PORTADA
El Turtle.

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, por fotocopia, por registro o por otros métodos, sin el previo consentimiento por escrito de los titulares del Copyright.

Primera Edición: Abril - 1995
1.250 ejemplares

Traductora:
Alison Canosa Uldall

© **Isdefe**
c/ Edison, 4
28006 Madrid.

Diseño:
HB&h Dirección de arte y producción

Infografía de portada:
Salvador Vivas

Fotomecánica:
Microprint, S.A.

Impresión:
Gráficas Marte, S.A. (Madrid)

ISBN: 84-89338-03-5
Depósito legal: M-14389-1995
Printed in Spain - Impreso en España.

PRÓLOGO

El enfoque sistémico, aplicado bajo diversos nombres tales como ingeniería de sistemas, se está extendiendo cada vez más en la sociedad contemporánea. Sus éxitos más notables han tenido lugar en el campo militar, la exploración espacial y la administración industrial. No obstante, sólo una parte pequeña de la sociedad participa en estas actividades. Las vagas afirmaciones sobre la generalidad de su aplicación no han sido probadas en una medida apreciable, por lo que el enfoque sistémico y sus derivados tienen un interés limitado, en el contexto de algunos de los problemas más acuciantes con los que se enfrenta la humanidad. Hace falta utilizar la ingeniería de sistemas «aplicada».

Todos los problemas contemporáneos de la sociedad, así como todos los problemas anteriores de la civilización, están relacionados con el «desarrollo», que es la disminución de la vulnerabilidad a los factores externos, y el logro de un mayor control sobre el destino y el entorno. El desarrollo global, regional, urbano, rural, industrial, económico, social y de recursos son sólo casos especiales del mismo fenómeno. El progreso tecnológico ya no puede ser considerado como un fin en sí mismo, sino que debe responder a las necesidades socioeconómicas.

Esta monografía trata de los problemas del desarrollo y del enfoque sistémico: damos énfasis a la resolución de los primeros y a

la promoción del último. Se ha escrito para aquellas personas dedicadas al desarrollo socioeconómico, independientemente de su localización geográfica, de su afiliación al sector público o privado y de su nivel jerárquico, y también para aquellas que estén interesadas en el enfoque sistémico, sea cual sea su disciplina profesional. Encontrarán esta monografía de utilidad ingenieros, planificadores y administradores, que quieran conocer más sobre la ingeniería de sistemas y como ésta puede aplicarse a sus problemas particulares.

La dinámica de sistemas aplicada trata de relacionar variables tecnológicas de decisión, como la capacidad de los embalses, las millas-carril de las autopistas, la producción eléctrica, el número de camas hospitalarias y el número de aviones de combate, con medidas socioeconómicas de su eficacia relacionadas con la renta per cápita, índice de desempleo, esperanza de vida, seguridad nacional, identidad cultural y calidad de vida. Estos temas se consideran desde la perspectiva de alguien que desarrolla modelos, y tratan el proceso real por medio del cual los modelos se crean y se utilizan. ¿Cómo se elige un problema que producirá resultados significativos? ¿Qué es lo que debe ser incluido en el modelo y qué es lo que puede ser ignorado? ¿Cómo se seleccionan los valores de los parámetros? ¿Cómo se sabe si el modelo es de alguna utilidad? ¿Cómo se puede transmitir el modelo a aquellas personas afectadas por el mismo? En resumen, ésta es una monografía práctica, en la que se intenta guiar tanto al principiante como a los profesionales con experiencia en el desarrollo de modelos.

El objetivo de esta monografía es ilustrar cómo el desarrollo de modelos de sistemas puede servir como un marco fundamental para aumentar la comprensión de algunos fenómenos observados, al proporcionar una base común en la que se unifican las matemáticas, las ciencias físicas, los estudios sociales, los cambios históricos y las experiencias de la vida personal de quién desarrolla los modelos. Con el fin de lograr este objetivo, se desarrollan 36 modelos relativos a una gran variedad de sistemas sociales, económicos, industriales y militares; todos éstos se ilustran por medio de las mismas

representaciones gráficas y matemáticas y se analizan utilizando los mismos métodos de estado estacionario y de estados transitorios. El objetivo de los modelos es ser ilustrativos, no concluyentes; es decir, intentan aumentar nuestro conocimiento de los problemas del mundo real, aunque los modelos sean hipotéticos. Cuando se aplican a situaciones reales, los modelos se podrían ampliar para establecer las consecuencias generales de las distintas opciones existentes en puntos concretos de decisión, y con la cuantificación suficiente para generar previsiones de elevada precisión mediante el uso de la simulación.

La ingeniería de sistemas aplicada trata del desarrollo de modelos. En cada uno de los 36 ejemplos nos hemos esforzado para proporcionar un «juguete», una representación del mundo real, con el cual se puede «jugar», es decir, con el cual uno puede experimentar sin tener que temer las consecuencias. Estos principios funcionan bien; citemos como ejemplo los simuladores de vuelo para aquéllos que están aprendiendo a volar, el uso de plantas piloto por los ingenieros de procesos químicos, o los modelos de flujo en ingeniería hidráulica. En el proceso de desarrollo y uso de estos modelos, se adquieren nuevos conocimientos con los que somos capaces de tomar mejores decisiones y formular mejores políticas. Se pueden diseñar sistemas de información para calibrar los modelos en el transcurso del tiempo, pudiéndose así mejorar los modelos y utilizarlos de una manera todavía más inteligente.

AGRADECIMIENTOS

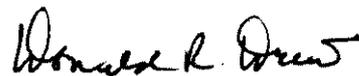
Esta monografía se inició como consecuencia de las conversaciones mantenidas a partir de Enero de 1994 entre Alberto Sols de Isdefe, Ingeniería de Sistemas de Defensa, y yo mismo. Como resultado de estas comunicaciones iniciales, se llegó a la conclusión de que Isdefe estaba interesada en evaluar la disciplina «Dinámica de Sistemas Aplicada», como parte de una serie de monografías sobre temas de interés para el Ministerio de Defensa. Al principio, se quería centrar la atención principal en áreas de aplicación relacionadas con la seguridad nacional. No obstante, en su carta del 20 de Junio de 1994, Alberto me comunicó que el Comité de Redacción del Proyecto de Monografías estimaba que la monografía propuesta «no tratara únicamente de cuestiones de interés para la comunidad de defensa, sino también para el sector civil». Por consiguiente, el marco fue producir una monografía «que mostrase, por medio de ejemplos seleccionados, algunos de los muchos entornos para los que pueden obtenerse resultados útiles con la aplicación de la ingeniería de sistemas».

Mi selección de ejemplos para esta monografía ha estado influida por lo que aprendí sobre Isdefe. Fundada en 1985 por el Ministerio de Defensa, esta empresa proporciona servicios a más de 25 oficinas nacionales e internacionales, tanto en la esfera de defensa como en la civil. En menos de una década, Isdefe se ha convertido en líder del mercado español en los campos de consultoría, ingeniería de sistemas,

ingeniería orientada al cliente y servicios profesionales para grandes proyectos. Se desarrollan 36 modelos y se ilustran de forma verbal, visual y matemática, en un área amplia de sistemas sociales, económicos, industriales y militares, para transmitir el significado de la expresión «Dinámica de Sistemas Aplicada». Por consiguiente, en primer lugar y ante todo, me gustaría dar las gracias al Comité de Redacción de Isdefe en general y, en particular, a Alberto Sols en su calidad de hombre de contacto en este proyecto.

Quiero manifestar mi profundo reconocimiento a mis colegas y estudiantes a lo largo de los años, que me han ayudado a formalizar el concepto de «Ingeniería de Sistemas Aplicada», en forma de cursos, a partir de 1964 en la Universidad A&M de Texas, de 1968 en el Instituto Asiático de Tecnología, de 1974 en la Universidad de Australia Occidental, de 1976 en el Instituto Politécnico y la Universidad Estatal de Virginia, y en la Universidad Americana de Beirut en 1979. La mayor parte del material presentado en esta monografía se basa en la experiencia adquirida en la reformulación de estos cursos en estos distintos entornos.

Todos aquéllos que conocen la metodología de la dinámica de sistemas apreciarán su influencia en mi interpretación del desarrollo de modelos para sistemas dinámicos. En 1965, como Profesor Visitante en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), entré en contacto con la metodología del Profesor Jay Forrester que por aquel entonces se denominaba «Dinámica Industrial». A través de los años he modificado la convención de los diagramas causales hasta lograr la forma en la que aparecen en esta monografía, y he tendido a resaltar el uso de las soluciones analíticas junto con la simulación para mejorar la presentación de los resultados. Guardo una gratitud permanente al Profesor Forrester y a la Escuela de Gestión Sloan del MIT por su influencia, que me condujo a formular la «Dinámica de Sistemas Aplicada».



Donald R. Drew

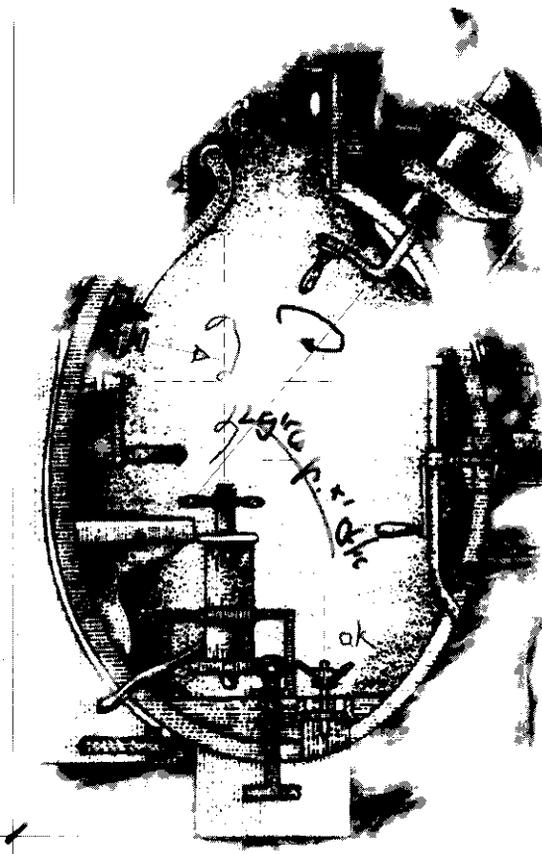
ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Finalidad y objetivos	14
1.2. Ingeniería de sistemas	14
1.3. El desarrollo de modelos de sistemas	16
1.4. Desarrollo de diagramas causales	18
1.5. Descripción de la metodología de desarrollo de modelos	21
1.6. Resumen	23
2. ANÁLISIS DE SISTEMAS DE REALIMENTACIÓN	27
2.1. Introducción	28
2.2. Realimentación positiva de primer orden	30
2.3. Realimentación negativa de primer orden	35
2.4. Sistemas acoplados de realimentación lineal	40
2.5. Sistemas acoplados de realimentación no lineal	41
2.6. Sistemas conservativos de primer orden	45
2.7. Realimentación negativa de segundo orden	46
2.8. Realimentación positiva de segundo orden	52
2.9. Bucles negativos de segundo orden con bucles de primer orden	58
2.10. Bucles positivos de segundo orden con bucles de primer orden	59
2.11. Realimentación negativa amortiguada de segundo orden	62
2.12. Resumen	62
3. DESARROLLO INDUCIDO POR LAS INFRAESTRUCTURAS	67
3.1. Introducción	68
3.2. Necesidades y método	69
3.3. Sistemas para el desarrollo de modelos regionales	71
3.4. Modelo de las economías nacionales	72
3.5. Modelo de sistemas urbanos	75
3.6. Modelo de infraestructuras de recursos de agua	83
3.7. Desarrollo inducido por el transporte	87
3.8. Mantenimiento de infraestructuras	100
3.9. Desarrollo sostenible	103
3.10. Desarrollo mundial	108
3.11. Resumen	113

4. DINÁMICA DE SISTEMAS MILITARES	121
4.1. Introducción	122
4.2. Modelo de combate	123
4.3. Modelos clásicos de atrición	126
4.4. Interdicción de objetivos	129
4.5. Supresión de amenazas por medio de fuego dirigido	133
4.6. Fuego de área	141
4.7. Paridad y pérdidas aceptables	143
4.8. Multiplicadores de fuerza	148
4.9. Disponibilidad para el combate	152
4.10. Economía de defensa	155
4.11. Modelo del presupuesto de defensa	159
4.12. Resumen	163
5. ENFOQUE SISTÉMICO AL FUTURO	167
5.1. Introducción	168
5.2. El diseño del desarrollo sostenible	169
5.3. El proceso del desarrollo de modelos	171
5.4. Realización de una capacidad de sistemas	172
5.5. El seguimiento del progreso	174
5.6. Predicciones, estrategias y políticas	176
5.7. El laboratorio de formación	177
5.8. Promesa del enfoque sistémico	177
5.9. Epílogo	179
REFERENCIAS	183
BIBLIOGRAFÍA	189
GLOSARIO	199

1

Introducción



1.1 Finalidad y objetivos

El objetivo de esta monografía es identificar el nuevo papel de la ingeniería de sistemas y mostrar, a través de ejemplos seleccionados, algunos de los muchos entornos que pueden beneficiarse de su aplicación. Los objetivos específicos son: (1) definir la ingeniería de sistemas en el contexto de la metodología de sistemas; (2) mostrar cómo se puede utilizar este enfoque sistémico para estructurar nuestros conocimientos de forma que proporcionen una base sobre la que añadir nuevos conocimientos, así como hacer posible la transferencia de conocimientos entre distintas disciplinas; y (3) *mejorar nuestra capacidad para la resolución de problemas desarrollando modelos para los mismos, y utilizando variables relacionadas causalmente.*

1.2 Ingeniería de sistemas

La *conceptualización de sistemas como método de resolución de problemas* empezó cuando se hizo aparente que el potencial social de las máquinas como herramientas es mucho menos importante que las posibilidades creadas cuando se combinan máquinas de funciones algo distintas, aunque complementarias. Esta apreciación está dando lugar a una nueva era, que se conoce cada vez más como la «Era de los Sistemas».

La mayor parte de las teorías y dispositivos desarrollados hasta la Segunda Guerra Mundial tenían la suficiente sencillez como para que fuera posible que una sola persona pudiera comprenderlos. Como ingeniero, Henry Ford conocía todas y cada una de las piezas de su Modelo T; en su calidad de ejecutivo, conocía todos los aspectos de la producción en serie. La tecnología moderna ya no puede ser comprendida totalmente de esta manera. Es una tecnología asociada con grandes sistemas, con un gran número de elementos constituyentes interdependientes, que sirven para llevar a cabo una función específica; constan también de elementos sociales y técnicos, comparten recursos, y están controlados por un conjunto de objetivos y limitaciones interrelacionados.

Una de las grandes paradojas es que a pesar del rápido cambio tecnológico y del crecimiento de los conocimientos fundamentales, la resolución de problemas contemporáneos no se ha hecho más fácil. Una de las razones es la superespecialización, esto es, la tendencia de los profesionales a reducir cada vez más su área, y de los científicos a dividir en compartimientos su conocimiento. Inevitablemente, hay una falta de preocupación social, simplemente debida a que las necesidades sociales se expresan raramente de una forma a la que pueda aplicarse sencilla y directamente los conocimientos de un especialista.

Definimos la ingeniería de sistemas como un método de resolución de problemas complejos donde figura la tecnología, sin estar limitado a ella, en el contexto de los entornos físicos, sociales, económicos y culturales en los que estos problemas existen; para ello, se usan metodologías de utilidad actual y potencial en el proceso de toma de decisiones en los sectores públicos y privados. No podemos exagerar la importancia, en la creación de sistemas de ingeniería, de los aspectos sociales, económicos, culturales y del entorno. El reconocimiento de que estas consideraciones son esenciales es relativamente nuevo, y por tanto relativamente limitado. Esta nueva importancia es el resultado de la evolución que ha experimentado la

ingeniería, desde el dimensionamiento detallado de dispositivos y componentes hasta el diseño de sistemas. Puesto que la ingeniería trata más explícitamente con los sistemas, debemos tratar las nuevas cuestiones y utilizar nuevos medios, apropiados para el desarrollo y análisis de modelos.

1.3 El desarrollo de modelos de sistemas

Un aspecto importante del enfoque sistémico es la construcción de modelos. Un modelo es una abstracción de la realidad que captura la esencia funcional del sistema, con el detalle suficiente como para que pueda utilizarse en la investigación y la experimentación en lugar del sistema real, con menos riesgo, tiempo y coste. En la medida en que un modelo particular es una representación apropiada del sistema, puede ser una ayuda muy valiosa para el análisis de políticas, la toma de decisiones y la resolución de problemas.

En la ingeniería de sistemas aplicada, se utilizan tres formas complementarias de construcción de modelos: verbal, gráfica y matemática. Los modelos verbales tienden a ser descripciones escritas o expresiones orales del fenómeno en cuestión. De forma explícita, reflejan las ideas implícitas de un modelo mental, y constituyen un medio esencial para mejorarlo. Los modelos gráficos están formados por diagramas que proporcionan un nexo de unión entre los modelos matemáticos y verbales, por una parte, y el autor del modelo y su audiencia, por la otra.

Los modelos matemáticos son «simbólicos», ya que para describir un sistema emplean normalmente notaciones matemáticas en forma de ecuaciones. A menudo estas ecuaciones matemáticas tienen representaciones gráficas análogas. Hay tres características de los modelos matemáticos que los hacen particularmente útiles: son precisos, concisos y manejables. Desafortunadamente, por otra parte, estas características tan deseables no son en general apreciadas por

los políticos que no comprenden la simbología o las reglas de utilización. Idealmente, esta barrera en la comunicación entre los autores de los modelos y sus usuarios se salva gracias al uso de modelos verbales o gráficos.

Con el advenimiento de la Era de los Sistemas han aparecido varias tendencias metodológicas basadas en procedimientos, herramientas y técnicas diferenciadas. Estas incluyen la programación lineal, la econometría, el análisis de entradas y salidas (input-output), la simulación estocástica y la dinámica de sistemas. Todas estas tendencias existentes para el desarrollo de modelos tienen en común varios conceptos relativos a las propiedades de los sistemas del mundo real, el proceso de desarrollo de modelos, el uso del ordenador y el papel de los modelos en el proceso de toma de decisiones. Además de estos conceptos comunes y generales entre todos los modelos matemáticos, cada tendencia metodológica emplea sus propias y únicas hipótesis básicas, o paradigmas, las cuales proporcionan una perspectiva única del mundo, desde el punto de vista de una disciplina particular del desarrollo de modelos, influyendo, de este modo, en el contenido y la forma de sus modelos.

Las distintas metodologías de sistemas pueden diferenciarse por el modo en que las personas que los desarrollan consideran el concepto de modelos. Se ponen de manifiesto tres tendencias. En la primera, se tiene una fe completa en un tipo de modelo matemático, dentro de cuyas limitaciones tiene que representarse. La programación lineal y los modelos de entradas y salidas (input-output) son ejemplos de esto. En la segunda, se mantiene que los datos lo son todo; en lugar de desarrollar modelos, los miembros de esta tendencia se limitan a obtener curvas que se ajusten a los datos. La econometría es una metodología de este tipo. En la tercera tendencia, se busca la realidad a través de un proceso interactivo entre la experiencia y la información, entre la mente y los datos. La dinámica de sistemas forma parte de esta última tendencia.

Estas tres tendencias del desarrollo de modelos se describen generalmente de la forma siguiente: (1) orientadas hacia la optimización; (2) casuales; y (3) causales. Se cree que los modelos causales tienen la máxima aplicación en la ingeniería de sistemas y reciben la atención central de esta monografía. Con todo esto en mente, definimos un «sistema» como un conjunto interconectado de elementos cuya «estructura» determina todas las modalidades del «comportamiento» dinámico. El «comportamiento» se refiere a los valores de las variables de sistema a lo largo del tiempo. La «estructura» se puede describir como el número, disposición, polaridad y orden de los bucles de realimentación en el modelo del sistema [1].

1.4 Desarrollo de diagramas causales

La premisa de una metodología de sistemas, tal como la dinámica de sistemas, es que las tendencias dinámicas persistentes en cualquier sistema complejo surgen a partir de sus estructuras causales, y a partir de los objetivos sociales, progreso tecnológico, limitaciones económicas, límites físicos y presiones políticas, que hacen que la gente se comporte de la manera que lo hace, y generan de forma acumulada las tendencias dinámicas del sistema total. Por consiguiente, un aspecto esencial del enfoque sistémico para desarrollar modelos es pensar en función de relaciones causa-efecto. Una herramienta importante para mostrar interacciones causa-efecto entre las variables clave durante el desarrollo del modelo de un sistema dinámico es el diagrama causal.

El primer paso para desarrollar un diagrama causal es identificar la variable clave que describe la situación del problema, y registrar el modo de funcionamiento del sistema que está siendo analizado. Estas variables clave, deducidas de un modelo mental o de una descripción verbal de un sistema, se representan en una hoja de papel. Las relaciones causa-efecto entre pares de variables se representan en la segunda fase por medio de flechas. Por ejemplo, una fuerza aplicada

a un objeto puede causar su aceleración, y la relación causal se representa como:

FUERZA → ACELERACIÓN

en donde la flecha entre las dos variables puede ser interpretada como «causa». A veces estos diagramas con flecha son más claros si uno se imagina la palabra «afecta» o «influye» en vez de causa, como en el ejemplo:

FUMAR → SALUD

En esta manifestación causal en donde se describe una relación entre dos cosas, está implícita la declaración: «mientras que todas las otras cosas sigan siendo iguales».

La tercera fase en el desarrollo de un diagrama causal es dar a cada enlace o flecha un signo direccional, más (+) o menos (-), colocado normalmente cerca de la punta de la flecha. Se presentarán algunos ejemplos y se darán las reglas generales:

Ejemplo 1. Un aumento de la tierra cultivable resulta en un aumento de las cosechas.

TIERRA CULTIVABLE $\xrightarrow{+}$ PRODUCCIÓN DE COSECHAS

Ejemplo 2. El aumento en el uso de los cinturones de seguridad disminuirá el número de muertos en la carretera.

USO DE CINTURONES DE SEGURIDAD $\xrightarrow{-}$ MUERTOS

Ejemplo 3. La disminución de la mano de obra produce una disminución del desempleo.

MANO DE OBRA $\xrightarrow{+}$ DESEMPLEO

Las relaciones causales entre las variables a veces se cierran sobre sí mismas y forman bucles de realimentación. Dentro de un bucle de realimentación, un cambio en una variable se transmite a través de la cadena entera de variables que forman el bucle, hasta que la causa inicial produce un efecto indirecto sobre sí misma. Un aspecto clave del análisis de un sistema es centrar la atención sobre los bucles de realimentación.

Roberts [2] se refiere a cuatro niveles jerárquicamente distintos de la estructura del sistema de realimentación: *variable*, *enlace*, *bucle de realimentación* y *sistema de realimentación*. Una variable es una cantidad que puede cambiar en función del tiempo. Puede ser una variable de decisión o una cantidad que se ve afectada por dichas decisiones. Cuando la variable no es afectada por otras variables del sistema, se denomina como «exógena» o externa al sistema. Una variable que es afectada por las otras variables del sistema se denomina «endógena».

Un enlace es la relación causa-efecto entre dos variables ilustrada mediante una flecha en el diagrama causal. Un bucle de realimentación consiste en dos o más enlaces conectados de tal modo que, a partir de cualquier variable, se puedan seguir las flechas y volver a la variable inicial. En toda ilustración causa-efecto de un bucle de realimentación están implícitos los retardos de tiempo desde cada decisión hasta cada una de sus consecuencias, y los retardos en la realimentación de la información de cada consecuencia hasta que influyen sobre la próxima decisión. Para lograr una mayor sencillez, las notaciones relativas a estos retardos de tiempo se omiten en los diagramas causales. Del mismo modo que los enlaces tienen dos direcciones posibles, los bucles de realimentación tienen también dos polaridades posibles, positiva o negativa. En la mitad de un bucle de realimentación se encuentra un símbolo que indica su polaridad, un signo positivo si el bucle actúa para reforzar los cambios de variables en la misma dirección que el cambio inicial, con lo que se contribuye al crecimiento o disminución sostenidos de las variables del bucle, y

un signo menos si el bucle actúa para resistirse u oponerse a los cambios de variables, y de este modo produce una tendencia contraria al cambio inicial y contribuye a la fluctuación o al mantenimiento del equilibrio del bucle. Una manera sencilla de determinar la polaridad de un bucle de realimentación es contar el número de enlaces negativos: si es par, el bucle es positivo; si es impar, el bucle es negativo.

Para evitar ecuaciones simultáneas en el modelo matemático derivado del diagrama causal, dentro del procedimiento del desarrollo del modelo se requiere un tratamiento especial para un bucle de realimentación. Una técnica, empleada en dinámica de sistemas, consiste en introducir en todo bucle de realimentación dos tipos especiales de variables, niveles y tasas de cambio. Una variable de nivel indica el estado del sistema, y una variable de tasa de cambio produce cambios en las variables de nivel a lo largo del tiempo. En el contexto de los diagramas causales, la relación causal entre una variable de tasa de cambio, tal como el índice de producción (estufas/semana), y una variable de nivel, tal como el inventario (estufas), es un «flujo físico» que estará representado por una línea sólida. No obstante, la relación entre la variable de nivel (inventario) y la variable de tasa de cambio (índice de producción) constituye un «flujo de información». Es la información relativa al estado del inventario la que influye en el índice de producción. El inventario no se transfiere físicamente al lugar de producción, es decir, a la fábrica. Pero la producción de la fábrica, medida en estufas por semana, se acumula como entidades físicas en inventario [3].

1.5 Descripción de la metodología de desarrollo de modelos

La metodología empleada en esta monografía utiliza todas las clases relevantes empleadas en la dinámica de sistemas, variables de nivel, variables de tasa de cambio, variables auxiliares y constantes. La diferencia estriba en que en los diagramas

dinámicos de sistemas son innecesarias las formas geométricas: rectángulos, válvulas, círculos, etc. Por ejemplo, una variable de nivel siempre está en la punta de una flecha continua, y una variable de tasa de cambio siempre está en el origen de una flecha continua. El signo sobre una flecha continua nos indica si la tasa de cambio se añade o se sustrae del nivel de una variable de «estado». Mientras que las flechas continuas indican flujos físicos, las flechas discontinuas en el diagrama causal definen flujos de información desde las variables de nivel hasta las tasas de cambio o variables de acción. Se llama variable auxiliar a cualquier variable intermedia en el camino desde una variable de nivel, o de una entrada exógena, hasta una variable de tasa de cambio. Los signos sobre las flechas discontinuas tienen la interpretación siguiente: un signo + significa que un aumento en el parámetro en el origen de la flecha causará un aumento en la variable de la punta de la flecha; un signo - significa que un aumento en el parámetro en el origen de la flecha causará una disminución en el parámetro de la punta de la flecha. Las entradas exógenas en un diagrama causal se identifican fácilmente porque no tienen flechas que terminen en las mismas, pero tienen una o más flechas cortadas que salen de ellas. En contraste, las variables auxiliares no forman parte del mismo sistema, sino que indican solamente su rendimiento y, por consiguiente, se identifican siempre porque están al final de una flecha discontinua, y no tienen flechas que emanen de ellas. Resumamos la convención de los diagramas causales: (1) las flechas describen la dirección de la causalidad entre pares de variables; (2) las líneas (continuas o discontinuas) denotan flujos (físicos o de información); y (3) los signos nos indican la naturaleza de la relación (directa o inversa) entre un par de variables dependientes-independientes.

La metodología utiliza el lenguaje de ordenador DYNAMO asociado con la dinámica de sistemas. En terminología de las ecuaciones de diferencias, cualquier variable de nivel L_i se expresa como función de las variables de tasa de cambio R_j y el valor previo del nivel:

$$L_i(t+dt) = L_i(t) + (dt) \sum_{j=1}^n R_j(t) \quad i = 1, \dots, m, \quad (1.5.1)$$

en donde las R_j 's se suponen constantes en el intervalo desde t a $t+dt$. Las variables de tasa de cambio tienen la forma

$$R_j(t) = F[L_i(t), E_k(t), A_{ij}(t), A_{kj}(t)] \quad (1.5.2)$$

en donde E_k son los impactos de las variables auxiliares en los flujos causales desde la variable i y la entrada exógena k , respectivamente. Puesto que las entradas exógenas son funciones conocidas del tiempo, o constantes, si se conocen los valores iniciales de las variables de nivel, todas las otras variables pueden calcularse a partir de ellas y para dicho intervalo de tiempo. Entonces, a partir de la ecuación (1.5.1), se pueden encontrar los nuevos valores de las variables de nivel para el próximo instante de tiempo.

En vez de subíndices, DYNAMO utiliza una notación especial en la que **.K** significa el tiempo actual, **.J** indica el tiempo pasado $t-dt$, y **.L** significa el instante futuro de tiempo $t+dt$; **dt** se llama al intervalo de la solución, el tiempo transcurrido entre dos cálculos sucesivos de la simulación. Puesto que se supone que las variables de tasas de cambio son constantes en el intervalo **dt**, se usa la notación **.JK** para tasas de cambio a la derecha de una ecuación y **.KL** para tasas de cambio a la izquierda.

1.6 Resumen

El hombre ha sido siempre consciente del concepto de sistema, el cual es la antítesis del caos. Los intentos de pensar sistemáticamente sobre los problemas persistentes han estado presentes a lo largo de los siglos. Pasando revista a la historia desde el principio de la civilización, el hombre ha inventado, entre otros, los sistemas siguientes: (1) el calendario; (2) la escritura como un medio mejorado

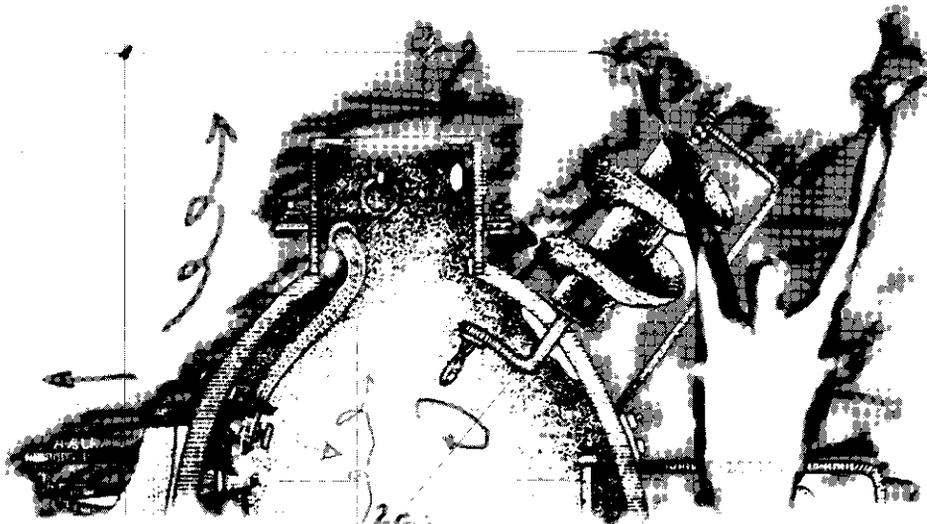
de comunicación; (3) las medidas, que hacen posible el establecimiento de estándares; (4) la clasificación de todos los seres vivos; (5) el concepto de sistema solar; y (6) la tabla periódica. No obstante, estos descubrimientos tienen más sentido en el contexto de estructurar el conocimiento con el fin de proporcionar una base para el aprendizaje, que como ejemplos del enfoque sistémico.

A pesar de tener unas raíces tan antiguas como las científicas, el enfoque sistémico está todavía en un estado embrionario, y esto da como resultado una falta de acuerdo en la definición de los términos, así como lo que puede denominarse una «ligereza léxica» en su uso. Esto se ve muy claramente en lo que se refiere a la expresión «pensamiento sistémico» (systems thinking). Pensamiento sistémico significa comprender cómo funciona el sistema, es decir, comprender los mecanismos en que se basan los procesos auto-organizadores y los procesos interactivos, y también comprender los efectos probables de estos procesos sobre el comportamiento [4].

Richmond [5] identifica tres cualificaciones relativas al pensamiento sistémico: pensamiento sobre sistemas como causa, pensamiento sobre bucles cerrados y pensamiento operativo. «Pensamiento sistémico como causa» es la noción de que es útil considerar la estructura de un sistema como la causa de los comportamientos exhibidos por el sistema, en vez de considerar estos comportamientos como resultado de factores externos. «Pensamiento sobre bucles cerrados» es el siguiente paso en la progresión: si la estructura es la causa del comportamiento, ¿cuáles son sus características, cómo se organiza? El «pensamiento operativo» completa la progresión. Los bucles cerrados (realimentación) están compuestos de inventarios (niveles) y flujos (tasas de cambio), de forma que puedan evitarse las ecuaciones simultáneas. Estas aplicaciones del pensamiento sistémico son el tema del Capítulo 2.

2

Análisis de sistemas de realimentación



2.1 Introducción

Un sistema de realimentación es uno o más bucles de realimentación conectados entre sí. El orden del sistema de realimentación se determina por los bucles de realimentación con el número máximo de variables de nivel en el bucle. El comportamiento de las variables en cada bucle de realimentación se puede propagar a través de la conexión, y afectar a otras variables de otros bucles dentro del sistema de realimentación. Estos sistemas, integrados por muchos bucles de realimentación conectados entre sí, describen problemas complejos de organización. Los métodos analíticos formales son difíciles de aplicar a medida que la complejidad de la realimentación aumenta. Este Capítulo centra su atención en el área del análisis de sistemas de realimentación con múltiples bucles.

Un modelo es una representación simplificada de ciertos aspectos de un sistema real. Un modelo matemático es un modelo creado en el que se utilizan conceptos matemáticos, como funciones y ecuaciones. Cuando creamos modelos matemáticos, dejamos tras nosotros el mundo real para adentrarnos en un mundo abstracto de conceptos matemáticos donde se construye el modelo. Entonces manipulamos el modelo con técnicas matemáticas o por medio de cálculos numéricos por ordenador. Finalmente, volvemos al mundo real con la solución del problema matemático, que posteriormente se convierte en una solución útil al problema real. Es importante recalcar que el principio y el fin del proceso se sitúan en el mundo real.

En consonancia con nuestra definición de ingeniería de sistemas aplicada, es importante comprender desde el principio que el desarrollo de modelos matemáticos se lleva a cabo para resolver problemas. Sin embargo, hay que señalar que la resolución de problemas supone la resolución de modelos de los sistemas, cuyo comportamiento es aproximado al de los problemas. Puesto que el comportamiento está dado por la evolución de las variables del sistema a lo largo del tiempo, resolver un problema implica la determinación de los valores de las variables del sistema a lo largo del tiempo. Esta «solución» no tiene nada que ver con un resultado deseable. Además, existe una diferencia importante entre la solución de problemas, tal como la hemos definido, y las predicciones de comportamiento.

Cualquier modelo debe tener un objetivo definido que tiene que indicarse con claridad, implícita o explícitamente, desde el principio. Tanto el punto de vista del que hace el modelo como el objetivo del modelo influirán en su contenido. Al construir modelos, sin embargo, se busca una nueva percepción, como la comprensión de las consecuencias de líneas de acción alternativas, y no una previsión relativa al futuro. La ingeniería de sistemas aplicada es el arte y la ciencia del desarrollo de modelos matemáticos y su solución analítica, y/o la utilización de la simulación para llegar a conclusiones fiables acerca del comportamiento, a través de una comprensión cada vez mayor de la estructura de realimentación subyacente.

Es bien conocido que ciertos tipos de sistemas de realimentación crean ciertos tipos de comportamiento de sistemas. Por consiguiente, si se conoce el modo de comportamiento de referencia existente, debería ser posible inferir la estructura del sistema de realimentación, como el número y la estructura de los bucles de realimentación, su polaridad y orden. En las siguientes Secciones se analizará el comportamiento de diez estructuras básicas de sistemas de realimentación usando para ello distintas aplicaciones.

2.2 Realimentación positiva de primer orden

Una variable, en un bucle de realimentación positiva se realimenta a sí misma continuamente para reforzar su propio crecimiento o colapso. Un cambio inducido en cualquier variable del bucle sólo puede conllevar el refuerzo o aceleración del cambio inicial. Expresiones tan familiares como el «efecto de arrastre», el «efecto bola de nieve» y «círculo vicioso», que se utilizan para describir el crecimiento de un movimiento político, la extensión de una moda y la carrera de armamento nuclear, son características y sinónimos del fenómeno de realimentación positiva.

Se presentarán dos ejemplos de sistemas de realimentación positivos de primer orden mediante la descripción verbal, el diagrama causal, las ecuaciones DYNAMO, la solución analítica, la solución simulada y el formato gráfico de salida. El primer ejemplo se denomina «El Modelo de Crecimiento de Autopistas». Aunque el crecimiento del transporte por autopista es un fenómeno mundial, es de especial interés en los Estados Unidos porque es el resultado lógico de la creación de un fondo reservado para autopistas, en el que todos los ingresos de las autopistas deben ser utilizados para el mantenimiento y construcción de éstas. Considérese la siguiente descripción verbal del modelo: la variable **HWY**, Autopistas, es incrementada por **HWYC**, Construcción de Autopistas, y reducida por **HWYA**, Abandono de Autopistas. **HWYA** es una constante **C**, pero **HWYC** se incrementa cuando aumenta **HWYR**, Ingresos de Autopistas, y baja cuando aumenta **CC**, Costes de Construcción. **HWYR** varía directamente con **HWY**, **RGPVM**, Ingresos Generados por Vehículo/Milla, y **ATV**, Volumen Anual de Tráfico.

El diagrama causal que corresponde a la descripción verbal aparece en la Figura 2.2.1 (a) y las ecuaciones DYNAMO derivadas del diagrama causal están en la Figura 2.2.1 (b). El análisis dimensional es útil a la hora de escribir las ecuaciones a partir de la relación causal en el diagrama. La solución analítica realizada en la Figura 2.2.1 (c) consiste en dos partes: análisis del estado estacionario, y análisis de

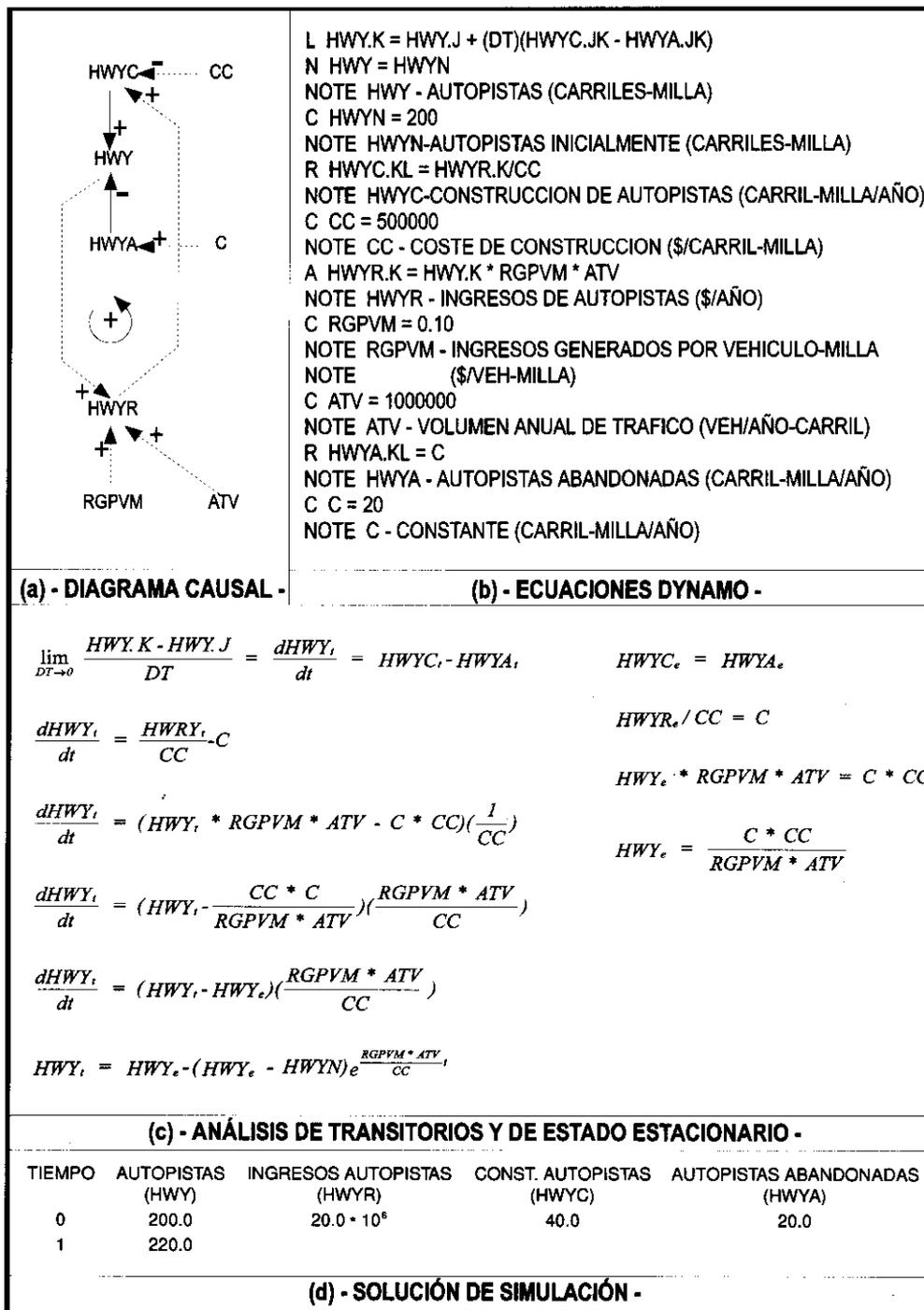


Figura 2.2.1. - MODELO DE CRECIMIENTO DE AUTOPISTAS -

estados transitorios. Los subíndices «e» y «t» en las variables significan «valor de la variable en estado de equilibrio estacionario» y «valor de la variable en el tiempo t». La Figura 2.2.1 (d) muestra el formato para obtener una solución utilizando la simulación para el intervalo de la solución $dt = 1$ año. El lector debe verificar que la solución de la simulación es una aproximación de la solución analítica y que se acerca a ella a medida que dt tiende a cero.

Una introducción fácil al tema de crecimiento y colapso puede obtenerse del examen de una situación de inversión, porque estos sistemas se conocen relativamente bien y tienen un interés intuitivo. Un asesor de inversiones cobra a sus clientes F dólares al año para gestionar sus cuentas de inversión, y les proporciona un interés anual garantizado del I por ciento compuesto. Si se reinvierten los beneficios E , se puede hacer un seguimiento del comportamiento del sistema observando el valor de la cuenta V .

El diagrama causal y las ecuaciones DYNAMO se presentan en las Figuras 2.2.2 (a) y (b). Con el fin de guiar el análisis, en las Figuras 2.2.2 (c) a (f) se dan respuestas a las cuestiones siguientes:

- (1) Determinar la inversión inicial mínima, $V(t=0) = V_0 = VN$, para que la cuenta crezca ($V_t > VN$) (véase la Figura 2.2.2 (c)).
- (2) Si la inversión inicial es $VN = 10000$, ¿cuál será el valor de la cuenta en veinte años? (véase la Figura 2.2.2(d)).
- (3) Si la inversión inicial es \$4740, ¿cuándo llegará el valor de la cuenta a cero? (véase la Figura 2.2.2 (e)).
- (4) ¿Qué inversión inicial es necesaria para que la cuenta se doble en doce años? (véase la Figura 2.2.2 (f)).

La respuesta a (1) se obtiene por el análisis de estado estacionario. La cuestión (2) ilustra el crecimiento exponencial, y la

	<p> $L \ V.K = V.J + (DT) (E.JK - F.JK)$ $N \ V = VN$ NOTE V - VALOR DE CUENTA (\$) $C \ VN = ?$ NOTE VN - VALOR INICIAL DE CUENTA (\$) $R \ E.KL = V.K * I$ NOTE E - BENEFICIOS (\$/AÑO) $C \ I = 0.12$ NOTE I - TASA DE INTERES (I/AÑO) $R \ F.KL = C$ NOTE F - HONORARIOS DE INVERSION (\$/AÑO) $C \ C = 900$ NOTE C - CONSTANTE (\$/AÑO) </p>
(a) - DIAGRAMA CAUSAL -	(b) - ECUACIONES DYNAMO -
<p> HALLAR EL MÍNIMO DEL VN PARA QUE V CREZCA $VN > V_e$ $VN > 7500$ </p>	<p> $E_e = F_e$ $V_e * I = C$ $V_e = C/I$ </p>
(c) - ANÁLISIS DE ESTADO ESTACIONARIO -	
<p> HALLAR V (t = 20) PARA VN = 10000 $V_{t=20} = 7500 + 2500 e^{0.12 * 20}$ $V_{t=20} = 7500 + 27558$ $V_{t=20} = 35058$ </p>	<p> $dV_t / dt = E_t - F_t = V_t * I - C$ $dV_t / dt = (V_t - (C/I)) * I$ $dV_t / dt = (V_t - V_e) * I$ $\int_{VN}^{V_t} \frac{dV_t}{V_t - V_e} = \int_0^t I * dt$ $V_t = V_e - (V_e - VN) e^{-I t}$ </p>
(d) - CRECIMIENTO EXPONENCIAL -	
<p> HALLAR t PARA $V_t = 0$ SI VN = 4740 $t = \frac{I}{I} \ln \frac{0 - 7500}{4740 - 7500} = 8.33 \text{ AÑOS}$ </p>	<p> $\ln \frac{V_t - V_e}{VN - V_e} = I * t$ </p>
(e) - COLAPSO EXPONENCIAL -	
<p>HALLAR EL VALOR DE VN PARA QUE V SE DUPLIQUE EN 12 AÑOS</p>	
<p> $\frac{V_{12}}{VN} = \frac{V_e - (V_e - VN) e^{12I}}{VN} = 2 \text{ da } VN = \frac{V_e(1 - e^{12I})}{(2 - e^{12I})} = \frac{7500(1 - 4.22)}{(2 - 4.22)} = 10878$ </p>	
(f) - AUMENTO EN UN FACTOR DE 2 -	

Figura 2.2.2. - MODELO DE INVERSIÓN -

(3) el colapso exponencial, ocurrido porque $VN > V_e$ y $VN < V_e$, respectivamente.

El cambio continuo en el ritmo de cambio de las variables de un bucle de realimentación positiva hace difícil una interpretación cuantitativa de su comportamiento. La constante de tiempo y el tiempo de doblaje son dos parámetros para interpretar el crecimiento exponencial que se utilizan en su caracterización.

La constante de tiempo, **TC**, es el tiempo que transcurriría hasta el equilibrio del sistema a su ritmo actual de cambio. Como el tiempo avanza desde el pasado al presente, una definición más apropiada para la constante de tiempo de un bucle de realimentación positiva es «el tiempo que hubiera tardado el sistema en transformarse desde el equilibrio hasta su estado actual, a su ritmo de cambio actual». La constante de tiempo **TC** es el intervalo sobre el eje del tiempo subtendido por cualquier punto sobre la curva de nivel y la intersección de la tangente a la curva de nivel en aquel punto con el valor de equilibrio de la variable de nivel. Matemáticamente esto se puede demostrar tomando la primera derivada de la ecuación para L_t en un sistema genérico de realimentación positiva de primer orden para obtener la pendiente de la tangente a L_t ,

$$L_t = L_e - (L_e - L_0)e^{Ft} \quad (2.2.1)$$

$$\frac{dL_t}{dt} = F(L_0 - L_e)e^{Ft} = F(L_t - L_e) \quad (2.2.2)$$

Según la definición,

$$TC \frac{dL_t}{dt} = L_t - L_e \quad (2.2.3)$$

Por tanto, la constante de tiempo de un bucle de realimentación positiva de primer orden es numéricamente igual al recíproco del factor de crecimiento F . Es decir

$$TC = 1 / F \quad (2.2.4)$$

El tiempo de doblaje de un bucle de realimentación positiva, TD , es el tiempo necesario para que una variable de nivel doble su distancia desde su valor de equilibrio. Matemáticamente esto se puede hallar resolviendo la siguiente ecuación para TD :

$$\frac{L_{t+TD} - L_e}{L_t - L_e} = 2 \quad (2.2.5)$$

Las sustituciones repetidas dan como resultado:

$$\frac{(L_0 - L_e)e^{F(t+TD)}}{(L_0 - L_e)e^{Ft}} = e^{TD/TC} = 2 \quad (2.2.6)$$

de lo que se deduce

$$TD = TC \ln 2 = 0.693 \quad TC \quad (2.2.7)$$

Por tanto, el tiempo de doblaje es aproximadamente el 70% de la constante de tiempo.

2.3 Realimentación negativa de primer orden

Los bucles de realimentación negativa tienen una mayor variabilidad en sus posibilidades de comportamiento que los bucles positivos. En todos los casos, un bucle negativo actúa para contrarrestar la dirección del cambio inicial en cualquiera de sus variables, pero se observan formas diferentes de fluctuación o comportamientos tendentes al equilibrio, cuando se pasa de sistemas de primer orden a sistemas de segundo orden. En esta Sección

sólo se contempla el primer orden, en el Modelo de Control de Almacenamiento de Agua (Figura 2.3.1) y en el Modelo de Compañía Contratista (Figura 2.3.2).

Con respecto al Modelo de Control de Almacenamiento de Agua, vamos a considerar un depósito como los que pueden ser utilizados en una ciudad pequeña. El depósito se llena mediante cañerías que provienen de una estación de bombeo, y a su vez da agua a la ciudad a través de una red de distribución. El tanque del depósito tiene un área de 2500 pies cuadrados y una altura de 30 pies, con una capacidad de almacenamiento de 75000 pies cúbicos. Se considera que una altura de agua de 25 pies es conveniente para el almacenamiento de emergencia y para garantizar una presión adecuada en las redes de distribución. El depósito está provisto de un sistema automático de control para regular el flujo de entrada, de forma que la discrepancia entre la altura real y la deseada estaría conectada con una constante de tiempo igual a diez minutos. Se supone que el ritmo de salida es una constante igual a 1000 metros cúbicos por minuto. Inicialmente el depósito tiene una altura de cinco pies.

El diagrama causal de la Figura 2.3.1(a) muestra que se ha elegido el volumen del tanque, **VOL**, como la variable de nivel con tasas de cambio, **QIN** y **QOUT**. Las ecuaciones DYNAMO están en la Figura 2.3.1(b). El modelo se resuelve analíticamente en la Figura 2.3.1(c) y la solución se presenta gráficamente en la Figura 2.3.1(d).

Los sistemas de realimentación negativa de primer orden pueden contener más de un bucle de realimentación negativa, como se demuestra con el Modelo de Compañía Contratista. La pequeña empresa de construcción es un fenómeno común. Habitualmente están constituidas por un capataz de la construcción con experiencia, o por un ingeniero joven con un camión de segunda mano, algunos materiales comprados a crédito y el primer trabajo concertado de antemano. Algunas de estas empresas hacen reales las esperanzas de sus fundadores y se convierten en prósperos negocios; sin embargo la mayoría quiebran. Se adelanta el principio de una interpretación general de la pequeña empresa constructora en la Figura 2.3.2.

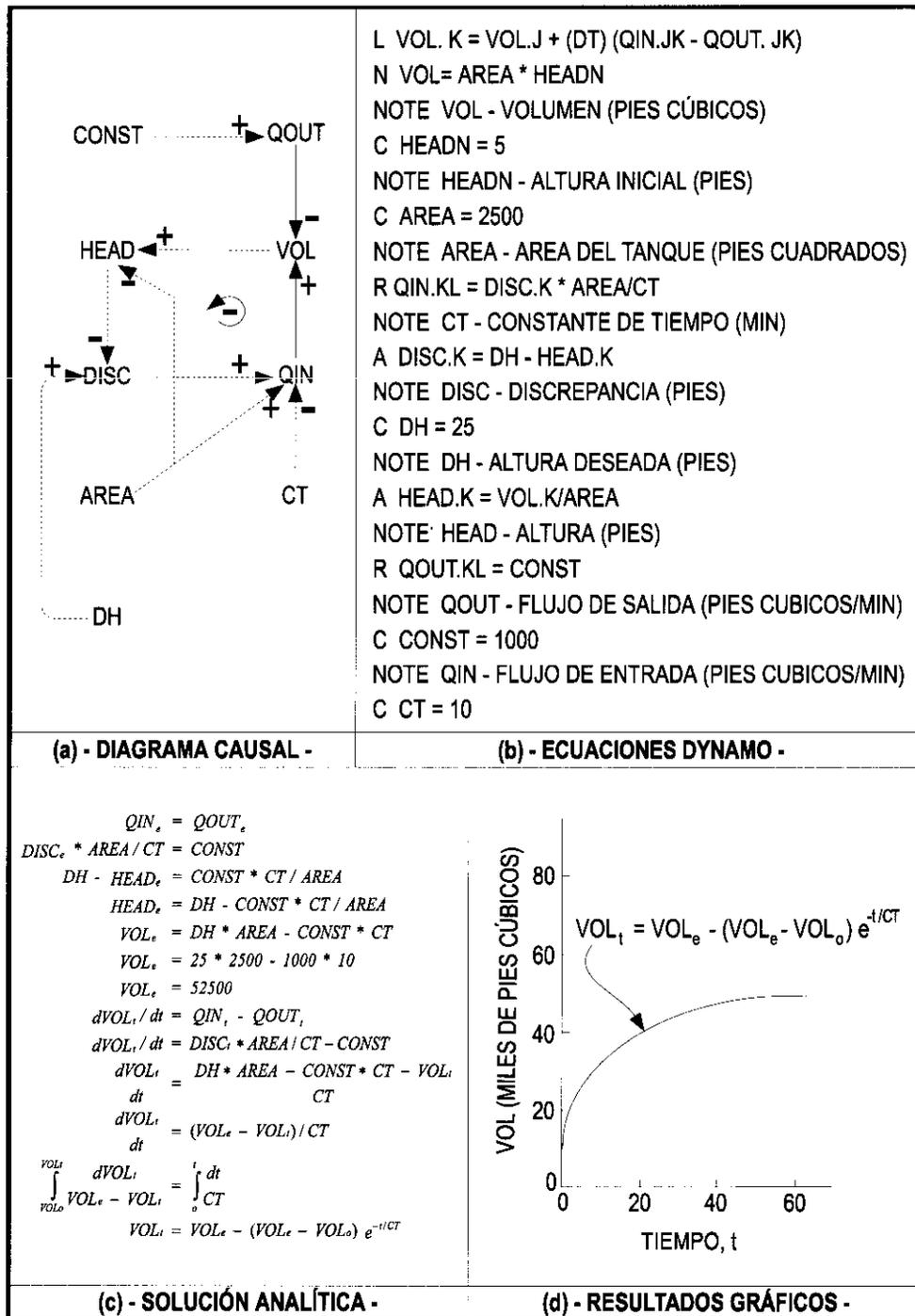


Figura 2.3.1 - MODELO DE CONTROL DE ALMACENAMIENTO DE AGUA -

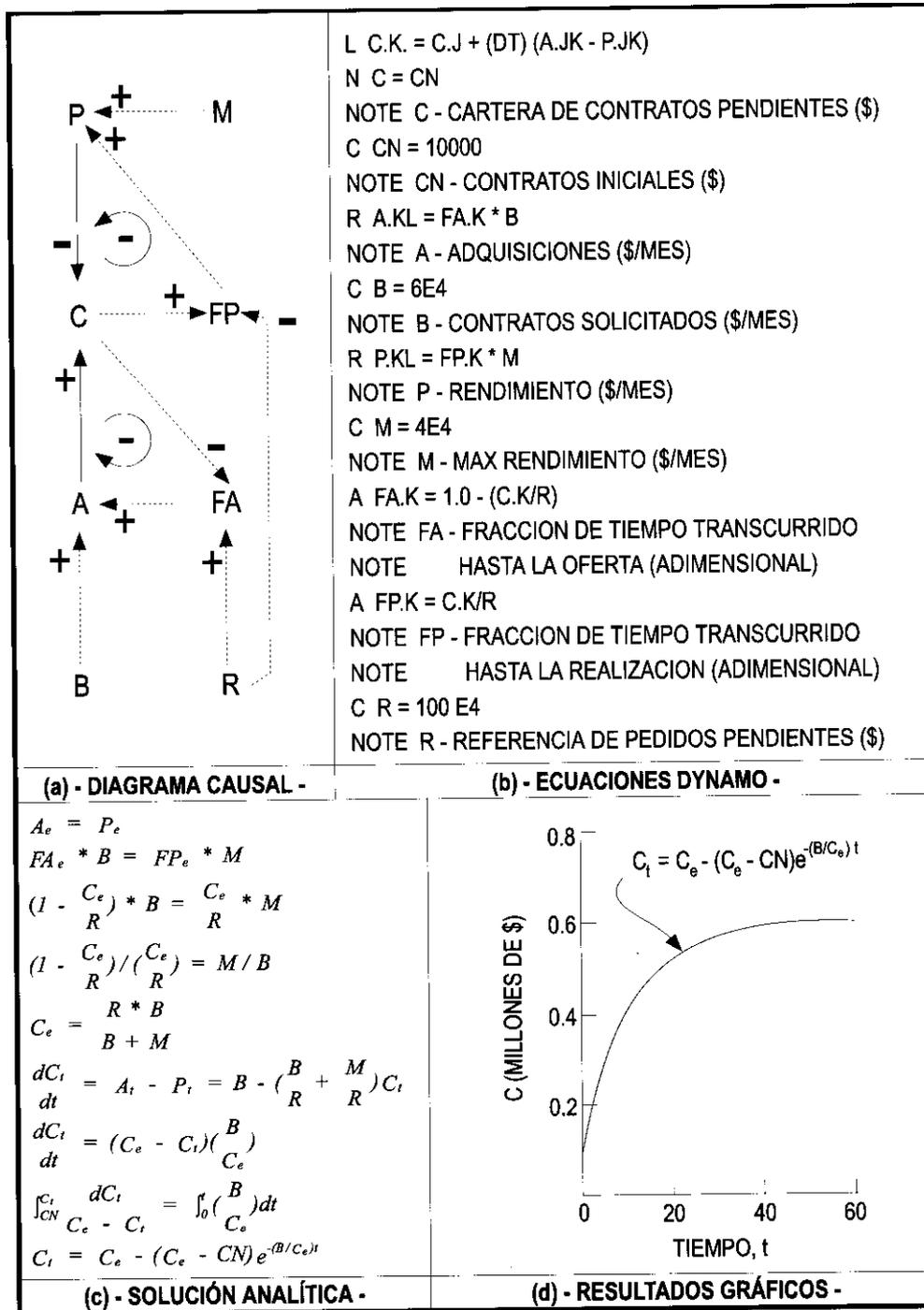


Figura 2.3.2 - MODELO DE COMPAÑÍA CONTRATISTA -

Los parámetros que caracterizan la realimentación negativa de primer orden son la constante de tiempo, **TC**, y el tiempo medio (o vida media), **TH**. La constante de tiempo es el tiempo que necesitaría el sistema para alcanzar el equilibrio a su ritmo actual de cambio. La interpretación física de la realimentación negativa se describe con base al siguiente método matemático. Por definición,

$$TC \frac{dL_t}{dt} = L_e - L_t \quad (2.3.1)$$

donde

$$L_t = L_e - (L_e - L_0)e^{-Ft} \quad (2.3.2)$$

$$\frac{dL_t}{dt} = F(L_e - L_0)e^{-Ft} = F(L_e - L_t) \quad (2.3.3)$$

Con la sustitución de (2.3.3) en (2.3.1),

$$TC = 1/F \quad (2.3.4)$$

El tiempo medio de un bucle de realimentación positiva de primer orden, **TH**, es el tiempo que necesita la variable de nivel para lograr la mitad del ajuste hasta el equilibrio. Se puede hallar resolviendo la siguiente ecuación para **TH**:

$$\frac{L_e - L_{t+TH}}{L_e - L_t} = 0.5 \quad (2.3.5)$$

Sustituyendo,

$$\frac{(L_e - L_0)e^{-F(t+TH)}}{(L_e - L_0)e^{-Ft}} = e^{-TH/TC} = 0.5 \quad (2.3.6)$$

ó

$$TH = -TC \ln 0.5 = 0.693 TC \quad (2.3.7)$$

2.4 Sistemas acoplados de realimentación lineal

Se determina la estructura de un bucle de realimentación por la secuencia de niveles y tasas de cambio alternos. El orden del bucle corresponde al número de niveles en el bucle. Como los niveles acumulan las tasas de flujo, las ecuaciones de nivel son en efecto ecuaciones integrales. El comportamiento dinámico surge del proceso de integración, que puede producir una forma y una posición en el tiempo diferentes a los de la velocidad de entrada.

El marketing acopla los recursos de una empresa con los deseos de sus clientes. Considérese la siguiente descripción verbal de un modelo que representa el crecimiento de las ventas, una parte de un Modelo de Crecimiento de Mercado formulado por Forrester [6].

Un esfuerzo en el campo del marketing se logra mediante la contratación de vendedores que son el motor que impulsa el crecimiento de ventas. El ritmo de contratación de vendedores, **SH**, que es la cantidad de vendedores contratados por mes, ajusta el número real de vendedores, **S**, a la plantilla de vendedores deseada, **DS**, mediante la comparación del número real y del número deseado de vendedores. El tiempo necesario para corregir esta discrepancia es el tiempo de ajuste de la plantilla de vendedores, **SAT**, que se expresa en meses. El número de pedidos recibidos, **OB** (unidades por mes), depende del número de vendedores y de la eficacia de ventas, **SE**, que se define como las unidades del producto vendidas cada mes por cada vendedor. El presupuesto, **B**, para los gastos mensuales de los vendedores se calcula multiplicando los pedidos por el ratio de ingresos a ventas, **RS**, que son los dólares por unidad que se asignan al coste de ventas. La plantilla de vendedores deseada varía y se determina dividiendo el presupuesto mensual por el sueldo medio del vendedor, **SS**. En otras palabras, la plantilla de vendedores deseada es el número que se puede justificar por el ritmo actual de nuevos pedidos.

En la Figura 2.4.1 se muestran los diagramas causales, las ecuaciones DYNAMO, las soluciones analíticas y los gráficos de las variables de nivel para tres condiciones. Básicamente, si el bucle de realimentación positiva domina, existe un crecimiento exponencial; si domina el bucle de realimentación negativa, existe un declive asintótico; y si los bucles están equilibrados, no existe crecimiento.

Este ejemplo es útil para demostrar la utilidad de las variables auxiliares en la elaboración de modelos. Mientras que teóricamente se pueden eliminar todas las variables auxiliares con la sustitución repetida en la variable de crecimiento, esto da lugar a un diagrama causal que prácticamente hace imposible la interpretación verbal o matemática del modelo (véase la Figura 2.4.1 (c)).

2.5 Sistemas acoplados de realimentación no lineal

En ingeniería de sistemas los problemas se conceptualizan como sistemas cuyo comportamiento es insatisfactorio, debido a una estructura defectuosa agravada por las influencias medioambientales prevaletentes. La caracterización del comportamiento de sistemas se hace por medio de una descripción dinámica de los estados del sistema (los valores de las variables de nivel en el transcurso del tiempo). La mayoría de los sistemas representan fenómenos en los que los cambios se manifiestan como crecimiento o decrecimiento. Hemos visto cómo los procesos de crecimiento muestran realimentación positiva, la cual, al ser ilimitada, alcanzaría proporciones arrolladoras en un mundo finito, si se dejara crecer sin control. Por supuesto, esto no ocurre porque el crecimiento interacciona con el entorno del sistema, de tal modo que reduce el ritmo de crecimiento.

Un comportamiento logístico o con forma **S** requiere que el sistema contenga un nivel controlado por un flujo de entrada y otro de salida. Además, es necesario que uno de estos flujos sea una función no lineal de la variable de nivel. En la dinámica de sistemas esta no

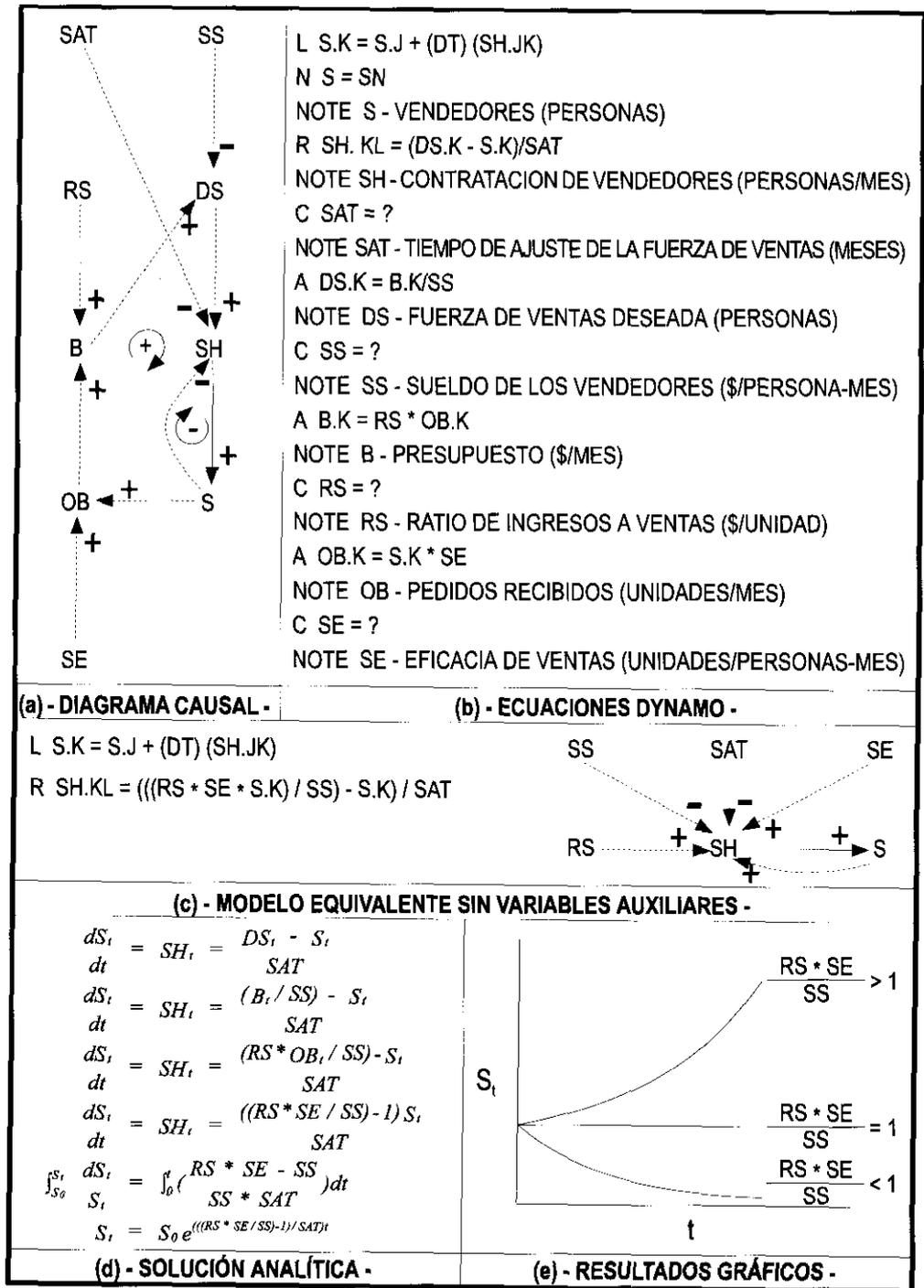


Figura 2.4.1 - MODELO DE CRECIMIENTO DE MERCADO -

linealidad se logra normalmente con la creación de un tercer bucle en torno a un «multiplicador» de tasas de cambio. En el Modelo de Desarrollo Industrial Urbano se ilustra este método para analizar el crecimiento de «saturación» (véase la Figura 2.5.1).

La dinámica del cambio en el número de establecimientos comerciales en un centro comercial, o de industrias en una zona de desarrollo económico, son ejemplos clásicos de crecimiento de tipo sigmoideal. Supongamos que el número de unidades industriales se incrementa con la construcción y decrece con la demolición. El ritmo de demolición depende del número de industrias y de la vida útil de las mismas. El ritmo de construcción también depende del número de industrias, de la disponibilidad de suelo y del atractivo de la zona debido a la interacción con otras industrias. Este modelo mental se detalla y representa en el diagrama causal en la Figura 2.5.1(a) y en las ecuaciones DYNAMO en la Figura 2.5.1(b). El análisis de estado estacionario para hallar I_e , el número de industrias cuando el tiempo tiende a infinito, y el análisis de estados transitorios para hallar I_t , se realiza en la Figura 2.5.1(c). El gráfico de I_t en función del tiempo se muestra en la Figura 2.5.1(d).

En las Secciones 2.4 y 2.5 hemos considerado los bucles de realimentación acoplados. Cuando se interconectan dos o más bucles de realimentación, las variables de cada bucle se pueden propagar a través de las conexiones, y afectar a variables en otros bucles del sistema de realimentación. Los bucles acoplados de realimentación pueden tener, o no, cambios en su preponderancia. En la Sección 2.4 no hay ningún cambio desde el crecimiento exponencial al asintótico para el modelo representado en la Figura 2.4.1, porque los dos crecimientos son lineales. Sin embargo, el modelo que se muestra en la Figura 2.5.1, descrito en esta Sección, contiene una velocidad de salida no lineal. A medida que va aumentando la velocidad de salida, se va aproximando a la velocidad de entrada hasta que se igualan, y entonces el crecimiento temporal cesa.

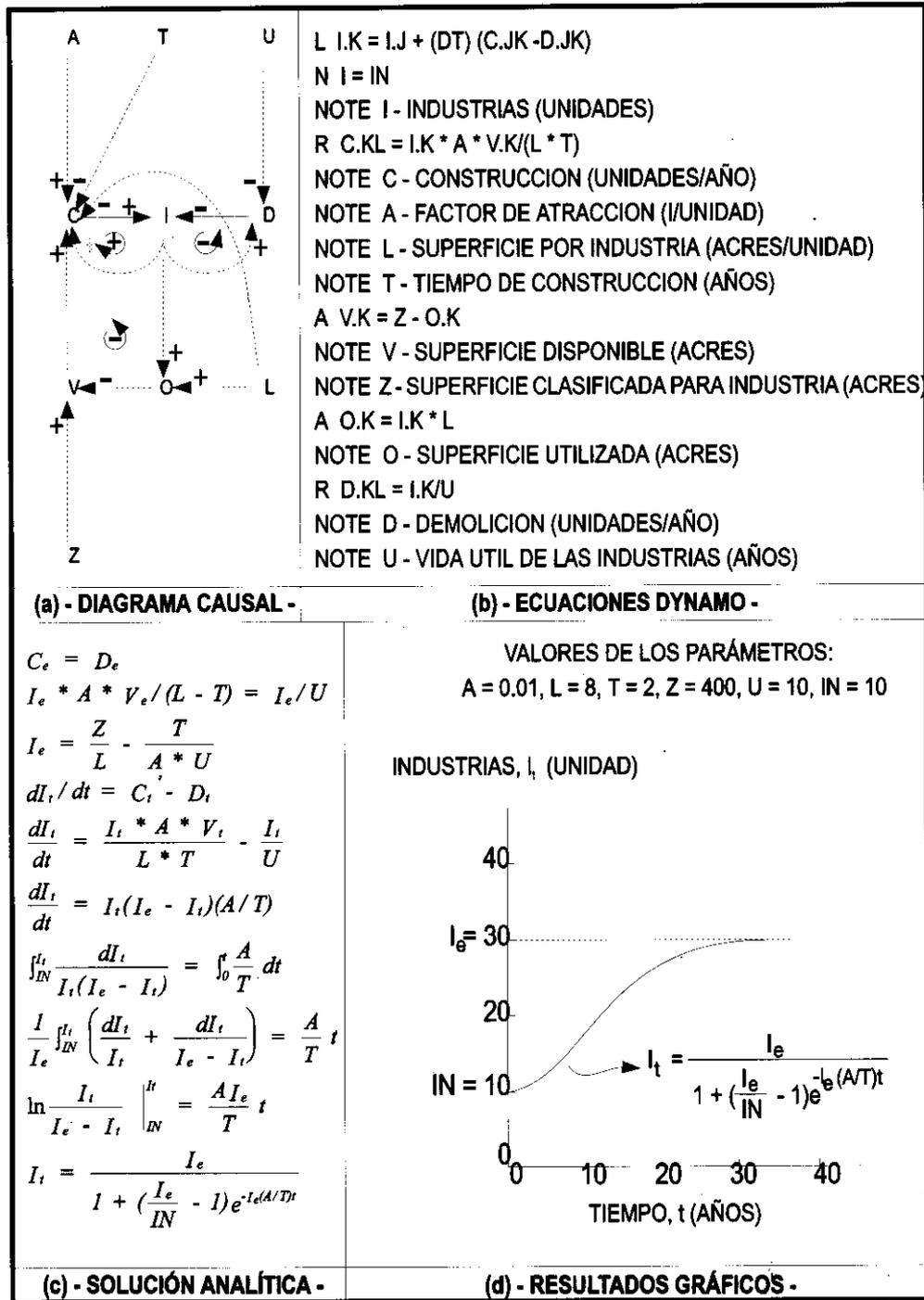


Figura 2.5.1 - MODELO DE DESARROLLO INDUSTRIAL URBANO -

2.6 Sistemas conservativos de primer orden

En la práctica, se tiende a construir los modelos dinámicos de realimentación de dos maneras básicas, que se pueden emplear separadamente o, preferiblemente, juntas. En el primer método, que es el tema de este Capítulo, se identifican las estructuras de realimentación responsables del comportamiento de sistemas. En el segundo método, que Wolstenholme [7] llama el método modular para la construcción de modelos, se empieza con una variable de nivel clave y se intenta crear un proceso físico inherente al sistema. Esto se puede repetir para cada recurso: tierra, agua, materiales, energía, productos, dinero, pedidos, trabajo, gestión, etc. El modelo se completa con la inclusión de las tasas entre los niveles, y representa la manera en que los recursos se convierten entre los estados de los procesos. En el desarrollo de modelos con este método es conveniente suponer, en la formulación inicial, que el flujo de recursos es «conservativo». Esto significa sencillamente que la suma de los valores de las variables de nivel para un solo recurso no cambia con el tiempo. Por consiguiente, este enfoque se llama «sistema conservativo».

Nuestro primer ejemplo de un sistema conservativo se describe en la Figura 2.6.1, Modelo de Suministro de Agua Urbano. La cantidad de agua que recoge un sistema urbano, la captación de las cuencas, **WR** (acres-pies por día), depende del área de las cuencas, **WA** (acres), la intensidad de lluvia y nieve que recibe la cuenca, **RI** (pies/día), la fracción perdida de la precipitación, **COR** (adimensional), y la capacidad del embalse, **RCAP** (acres-pie). Los embalses son grandes lagos artificiales creados al construirse una presa en la parte inferior de un valle. El tamaño requerido del embalse, su capacidad, depende de las variaciones estacionales de las pérdidas y del consumo. Algunos consumos se deben a: (1) uso residencial e industrial; (2) irrigación; (3) generación hidroeléctrica; (4) control de inundaciones; y (5) usos recreativos.

El consumo residencial e industrial urbano requiere que el agua del embalse sea transportada hasta las afueras de la zona urbana por

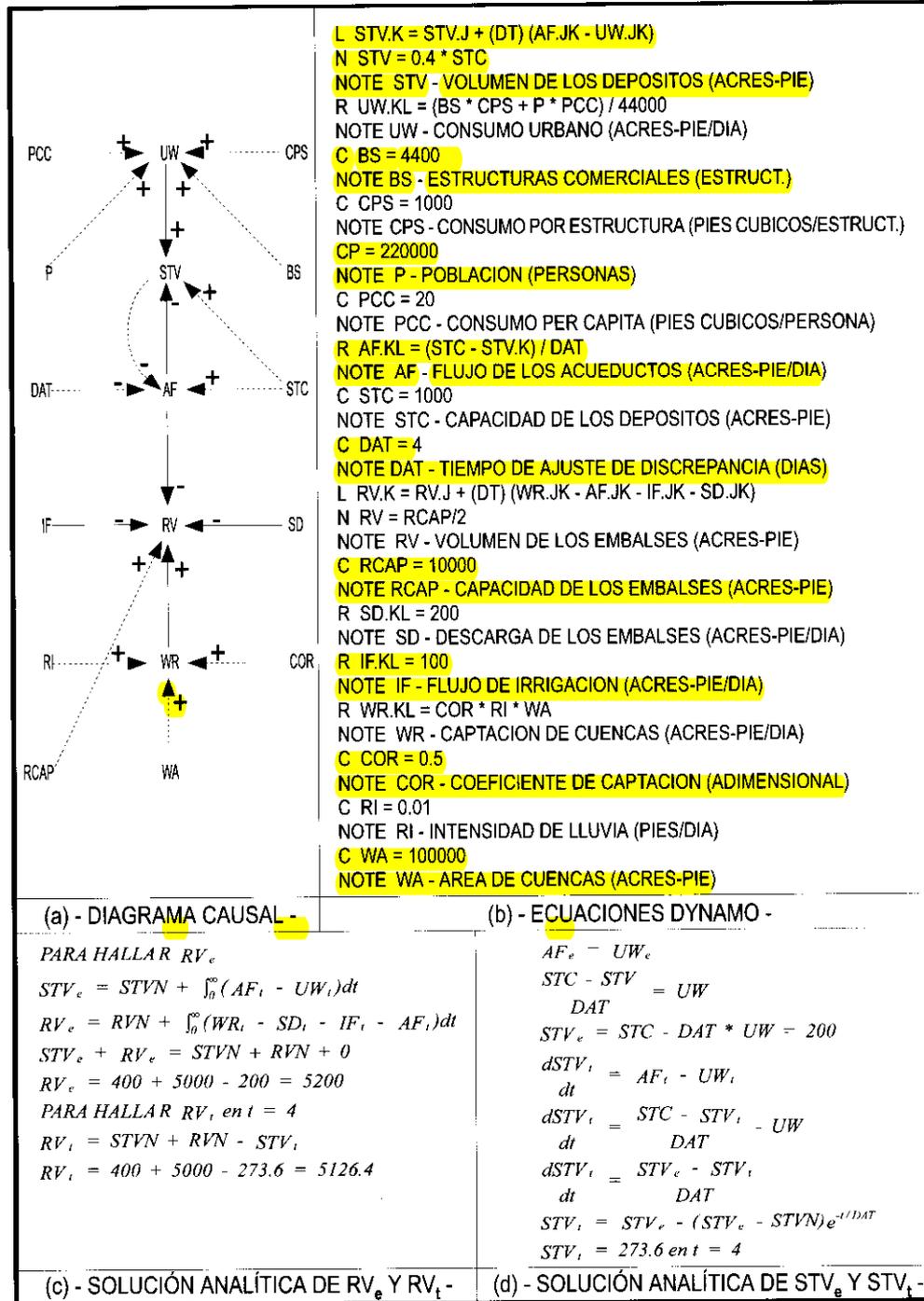


Figura 2.6.1 - MODELO DE SUMINISTRO DE AGUA URBANO -

medio de un acueducto. El consumo residencial, **RW**, (acres-pie/día) es el producto de la población, **P**, por el consumo per cápita, **PCC** (pies-cúbicos/día). El consumo industrial, **IW**, es el producto del número de industrias, **BS**, y el consumo por estructura **CPS** (pies-cúbicos/día). El flujo del acueducto, **AF** (acres-pie/día), debe ser lo suficientemente grande como para satisfacer las demandas punta, lo que se consigue construyendo en las cercanías de la ciudad depósitos de almacenamiento con una capacidad combinada **STC** (acres-pie).

Para las ecuaciones DYNAMO en la Figura 2.6.1(b), los valores estacionarios y transitorios de las dos variables de nivel, volumen del embalse, **RV**, y volumen de los depósitos de almacenamiento, **STV**, se incluyen en las Figuras 2.6.1(c) y (d).

El Modelo de Mantenimiento de Autopistas, resumido en la Figura 2.6.2, es nuestro segundo ejemplo de un sistema conservativo. Muchos de los Departamentos de Transporte de los Estados Unidos clasifican el mantenimiento de autopistas en dos categorías: mantenimiento ordinario y mantenimiento de sustitución. Estas categorías reflejan el alcance y la frecuencia del trabajo realizado. En este contexto el flujo de recursos son las millas de autopistas existentes en tres categorías según su estado de conservación: Autopistas Físicamente Suficientes, **PSH**, Autopistas Físicamente Deficientes, **PDFH**, y Autopistas Físicamente Deterioradas, **PDTH**. Consecuentemente con nuestra presentación formal, el diagrama causal, las ecuaciones DYNAMO, la solución de estado estacionario, y el análisis de estados transitorios se muestran en las Figuras 2.6.2 (a), (b), (c) y (d).

2.7 Realimentación negativa de segundo orden

Todos los bucles de realimentación positiva y los bucles de realimentación negativa de primer orden generan una respuesta en el tiempo de forma exponencial. Los bucles de realimentación negativa de orden más elevado (de segundo orden y mayor) pueden generar

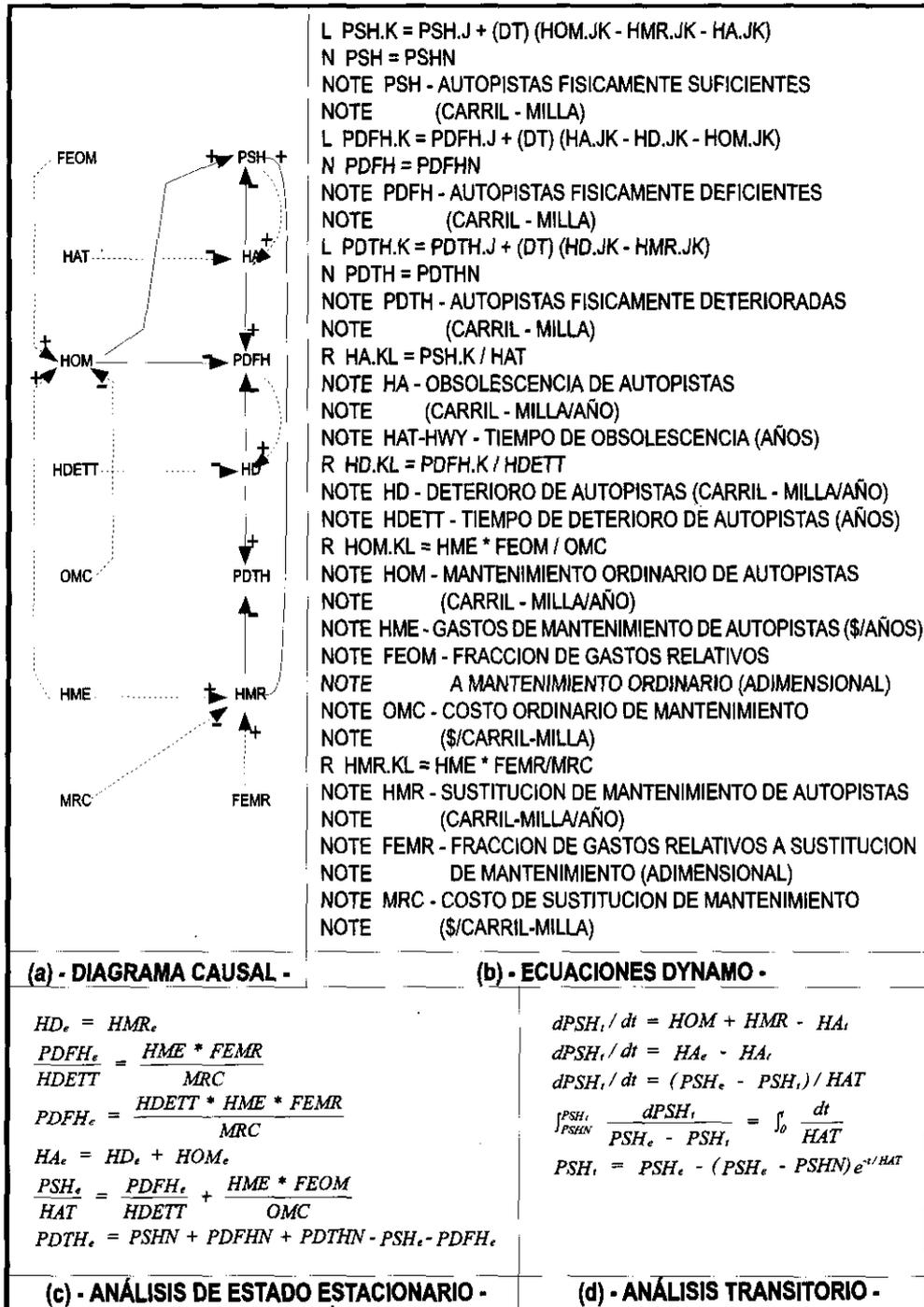


Figura 2.6.2 - MODELO DE MANTENIMIENTO DE AUTOPISTAS -

un comportamiento sinusoidal. En el resto del Capítulo se hablará de estos sistemas de segundo orden, comenzando por los más sencillos hasta llegar a los más complejos.

Para empezar, se examinará el comportamiento de un sistema de realimentación negativa de segundo orden con el Modelo de Tren Gravitacional Tubular que describimos a continuación. Con el logro de velocidades más elevadas en los sistemas de transporte terrestre, aumentan los problemas de seguridad, de contaminación medioambiental y de obtención de derechos de paso. Estos problemas podrían solventarse con el concepto del Tren Gravitacional Tubular, en el que una cápsula viajaría por un tubo muy por debajo de la superficie de la Tierra. La gravedad aceleraría o desaceleraría la cápsula. Para ilustrar el concepto, supongamos que Madrid y Barcelona están conectadas por un tubo dentro de un túnel construido sobre una cuerda a través de la Tierra. Las ecuaciones de movimiento escritas en DYNAMO para el sistema con la cápsula inicialmente en Madrid están en la Figura 2.7.1(a). El diagrama causal correspondiente está representado en la Figura 2.7.1(b), y la solución analítica aparece en la Figura 2.7.1(c). En la Figura 2.7.1(d) se encuentra lo siguiente: (1) el tiempo de viaje desde Madrid a Barcelona; (2) la posición de la cápsula después de una hora; y (3) la velocidad máxima de la cápsula. En la Figura 2.7.1(d), se repite el análisis para una cuerda que atraviesa el centro de la tierra desde Madrid a Wellington (Nueva Zelanda).

En el ejemplo del Tren Gravitacional Tubular, es evidente que los valores de equilibrio de las variables de nivel (la posición y velocidad de la cápsula) son iguales a cero, y que ambas variables pueden tomar valores positivos y negativos si no están en equilibrio. Esta es una característica que raramente existe fuera del ámbito de los sistemas mecánicos. En la mayoría de los sistemas del mundo real, es mucho más frecuente que los valores de equilibrio de los niveles tengan valores positivos con fluctuaciones que nunca caen por debajo de cero. Para lograr este tipo de comportamiento, un

L $X.K = X.J + (DT) (XC.JK)$
 N $X = -320 * CF$
 NOTE X - POSICION DE LA CAPSULA (PIES)
 C $CF = 5280$
 NOTE CF - FACTOR DE CONVERSION (PIES/MILLA)
 R $XC.KL = V.K$
 NOTE XC - CAMBIO DE POSICION (PIES/SEGUNDO)
 L $V.K = V.J + (DT) (A.JK)$
 N $V = 0$
 NOTE V - VELOCIDAD DE LA CAPSULA (PIES/SEGUNDO)
 R $A.KL = (-X.K) * (G/R)$
 NOTE A - ACELERACION DE LA CAPSULA (PIES/SEGUNDO²)
 C $G = 32.2$
 NOTE G - ACELERACION DE LA GRAVEDAD (PIES/SEGUNDO²)
 C $R = 4000 * CF$
 NOTE R - RADIO TERRESTRE (PIES)

(a) - ECUACIONES DYNAMO -

FORMACION DE ECUACION DIFERENCIAL DE 1^{er} ORDEN

$$dX_t / dt = XC_t = V_t$$

$$dV_t / dt = A_t = -X_t * G / R$$

FORMACION DE ECUACION DIFERENCIAL DE 2^o ORDEN

$$d^2 X_t / dt^2 = dV_t / dt = -X_t * G / R$$

SOLUCION GENERAL Y DERIVADAS

$$X_t = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t$$

$$dX_t / dt = C_1 \omega \cos \omega t - C_2 \omega \sin \omega t$$

$$d^2 X_t / dt^2 = -C_1 \omega^2 \sin \omega t - C_2 \omega^2 \cos \omega t$$

EVALUACION DE ω POR SUST. EN LA ECUACION DIFERENCIAL

$$(C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t) (-\omega^2 + G / R) = 0$$

EVALUACION DE C_1 Y C_2 A PARTIR DE LAS CONDIC. INICIALES

$$X_0 = C_1 \sin 0 + C_2 \cos 0 \quad \therefore C_2 = X_0$$

$$dX_t / dt = V_t = C_1 \omega \cos \omega t - C_2 \omega \sin \omega t$$

$$\therefore V_0 = C_1 \omega \text{ y } C_1 = V_0 / \omega$$

SOLUCION FINAL

$$X_t = X_0 \cos (2\pi / P)t$$

$$V_t = -X_0 \omega \sin (2\pi / P)t$$

(c) - SOLUCIÓN ANALÍTICA -

Figura 2.7.1 - MODELO DE TREN GRAVITACIONAL TUBULAR -

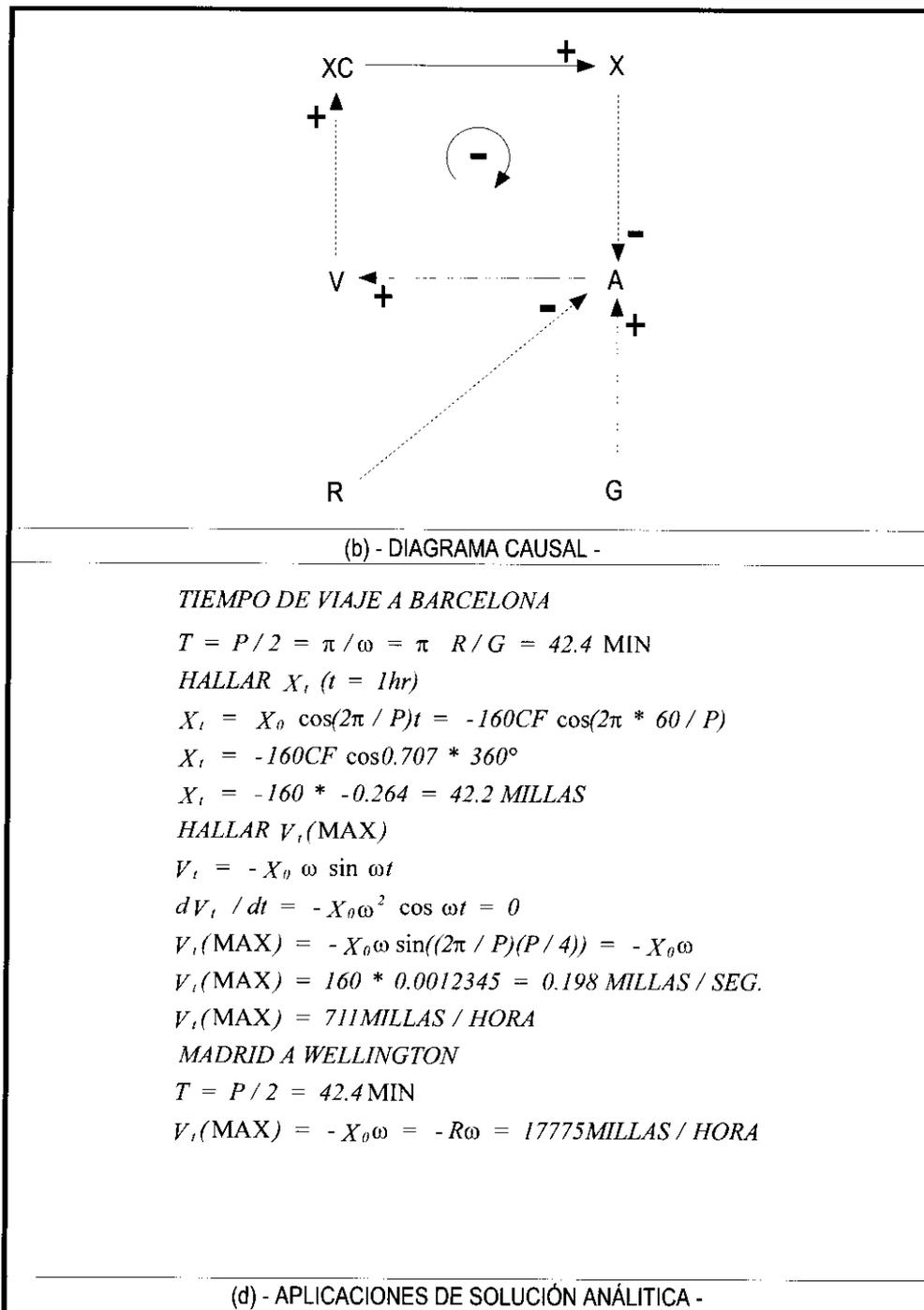


Figura 2.7.1 - MODELO DE TREN GRAVITACIONAL TUBULAR (Continuación) -

sistema de realimentación negativa de segundo orden debe tener un «rate-out» (tasa de salida) referente a uno de los niveles.

Consideremos el **Modelo de Oferta-Demanda** que se presenta en la Figura 2.7.2. El Índice de Producción, **PR**, aumenta el Inventario, **I**, y el Índice de Consumo, **CR**, lo disminuye. El Índice de Producción es una fracción de la Capacidad de Producción, **PC**. El Índice de Cambio de Capacidad, **CCR**, aumenta (o disminuye) la Capacidad de Producción. El Índice de Cambio de Capacidad es una respuesta a la diferencia entre el Inventario Deseado, **DI**, y el Inventario real, **I**. En la Figura 2.7.2, el gráfico de las variables de nivel verifica las oscilaciones sostenidas que se asocian con los sistemas de realimentación negativa de segundo orden. Estas fluctuaciones en el Inventario, **I**, y en la Capacidad de Producción, **PC**, no son bienvenidas en el mundo real. Vamos a suponer que la capacidad de producción se determina por el número de trabajadores multiplicado por la producción por trabajador. Las fluctuaciones en la capacidad de producción corresponden a la contratación y despido de trabajadores, o a las horas extras seguidas por un recorte de horas. Cuando se pide a los directores de empresa una explicación de estas fluctuaciones, casi siempre las achacan a las pautas de demanda estacionales. El modelo demuestra la falacia de esta interpretación, porque la Demanda, **D**, es una constante. La estructura del sistema, la organización y las políticas son quienes determinan el comportamiento del sistema, no los factores externos.

2.8 Realimentación positiva de segundo orden

A veces las variables de sistema interactúan y se realimentan entre sí, lo que lleva al crecimiento o declive exponencial de ambas variables. Cada variable actúa como estímulo para la respuesta de la otra. El ejemplo clásico de realimentación positiva de segundo orden es la carrera de armamentos durante la guerra fría, la cual tuvo al mundo como rehén durante cuarenta años después de la Segunda Guerra Mundial.

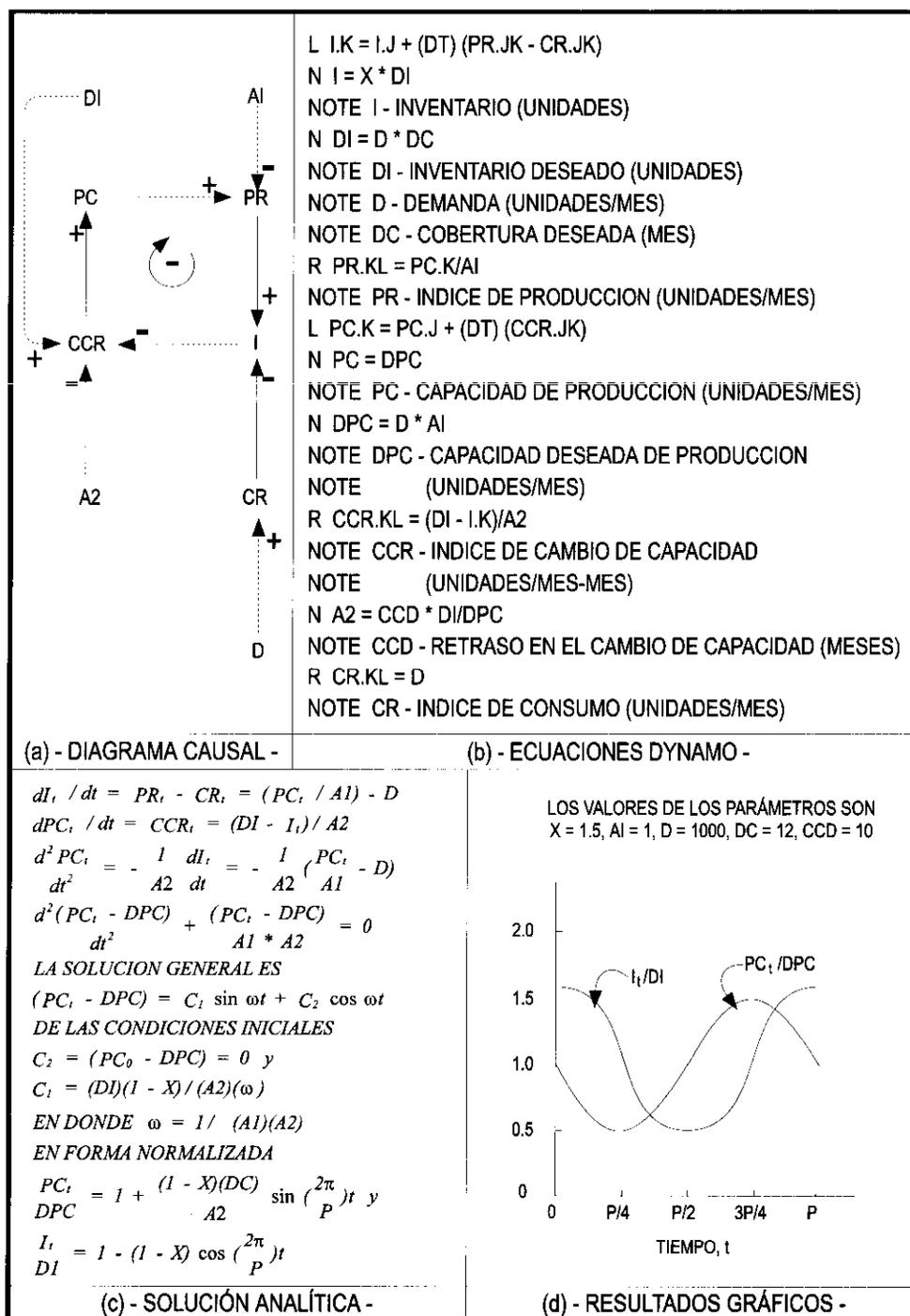


Figura 2.7.2 - MODELO DE OFERTA-DEMANDA -

La trayectoria demencial del armamento nuclear y las dificultades para controlarlo son estimuladas e inducidas por la dinámica contemporánea de armamentos, y por las teorías estratégicas dominantes. Un conjunto poderoso de factores estructurales, económicos, políticos y tecnológicos, se combinan para alimentar esta carrera. De acuerdo con el enfoque sistémico, se presenta una breve descripción verbal del problema, organizada de acuerdo con los bucles de realimentación más significativos, que aquí denominamos el Bucle de Acción-Reacción y el Bucle de Posicionamiento Interno.

El Bucle de Acción-Reacción ofrece la explicación, sencilla y extendida, de que la carrera de armamentos es la interacción competitiva orientada hacia el exterior entre diferentes actores de la escena internacional, alentada por las ansiedades nacionales. Según esta teoría, la carrera de armamentos está fomentada por las rivalidades entre dos o más estados; un aumento del armamento en un lado provoca la reacción del adversario. Depende de un modelo de acción-reacción que en realidad tiene como resultado una reacción excesiva constante. La dinámica de este modelo está impulsada en gran medida por los secretos, los cuales conducen al exceso, la redundancia y la desmesura. Además, se sostiene por los intereses económicos de aquellos que se benefician o se alimentan de la industria de armamentos; por los intereses corporativos de la burocracia; por los planes y necesidades de las élites políticas; y por los militares que tratan de lograr más y mejores armamentos.

El «Bucle de Posicionamiento Interno» ofrece otra explicación para la dinámica armamentista. Con frecuencia creciente encontramos factores internos de importancia decisiva. La maquinaria para la guerra tecnológica y sus derivados ocupan una de las primeras posiciones. Con el papel siempre en alza que juegan la modernización y las mejoras cualitativas en los sistemas de armamentos, éstos se ven impulsados cada vez más por el imperativo tecnológico, un motor autónomo construido internamente por la investigación y el desarrollo militar y los dirigentes armamentistas. Generalmente, la investigación y el

desarrollo militar se preocupan principalmente por sus propios avances tecnológicos. Nunca están satisfechos con su situación y cada mejora se toma como un paso hacia una mayor expansión tecnológica. El ambiente de secreto que rodea todo esto no permite que los rivales sigan de cerca los progresos del enemigo. La investigación y el desarrollo militar están condenados a reaccionar en gran medida a sus propios logros, en una *búsqueda continua* de la perfección. Es un proceso consustancial en el desarrollo y despliegue de sistemas de armas cada vez más nuevos. Los ciclos largos y el tiempo dilatado de realización de estos proyectos forman una continuidad que genera el llamado «imperativo de seguimiento», el cual impulsa los armamentos y suele actuar con independencia de lo que ocurre en el exterior.

En los Estados Unidos se desarrollaron dos estrategias para *terminar con la carrera* de armamentos; éstas se basaron en distintos puntos de vista acerca de cuál de los dos «bucles» citados arriba describía mejor la dinámica. La posición de las «palomas» era que, como la carrera de armamentos era un fenómeno de acción-reacción, el desarme unilateral por parte de USA llevaría a una respuesta similar por parte de la URSS. Los «halcones», por otra parte, adoptaron la posición de que el rearme soviético no era una respuesta a factores externos sino «una toma de posiciones internas», la manifestación de un dogma comunista que exigía la dominación del mundo.

El Modelo de Carrera de Armamentos intenta elegir entre estas posiciones con la puesta a prueba de dos modelos, para ver si el rearme militar soviético fue motivado por el nacionalismo (el Bucle Acción-Reacción) o por la ideología (el Bucle de Posicionamiento Interno). ¿Fue la respuesta inocente al crecimiento militar americano o fue el rechazo arrogante del equilibrio de posiciones de las dos superpotencias establecido al final de la Segunda Guerra Mundial? En la Figura 2.8.1 se desarrollan paralelamente dos escenarios. En primer lugar, hemos seleccionado variables que interactúan para generar el comportamiento dinámico de la carrera de armamentos. Consideremos una variable, Activos Militares: en 1960 las mejores

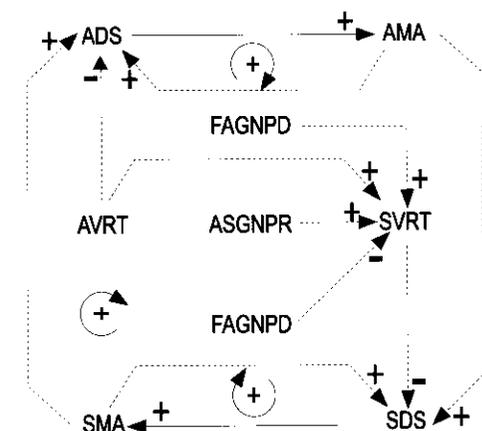
estimaciones cuantificaban los activos militares de los Estados Unidos en 1,2 billones de dólares, en comparación con activos soviéticos de aproximadamente 1,0 billones de dólares. El concepto de capital o activos militares refleja en este contexto el coste original de la inversión menos la depreciación. A finales de 1980, el último año para el que se hizo la comparación, se estimó que los Activos Militares Soviéticos, **SMA**, y los Activos Militares Americanos, **AMA**, eran iguales. Los Gastos Soviéticos de Defensa, **SDS**, y los Gastos Americanos de Defensa, **ADS**, aumentan estas variables de «estado» anualmente.

Con el Escenario 1 de la Carrera de Armamentos, se determinó que para que los Activos Militares Soviéticos, **SMA**, igualasen a los Activos Militares Americanos, **AMA**, en 1980, la Fracción del PNB Soviético dedicado a defensa, **FSGNPD**, tendría que ser igual a 0,1182. Con el Escenario 2 de la Carrera de Armamentos, se encontró que para mantener la misma posición como la que se midió en el ratio de **SMA** a **AMA**, el **FSGNPD** sólo tendría que ser 0,0694. Ahora se sabe que el valor 11,82% es el correcto.

A lo largo de la historia ha habido un debate constante sobre las causas de la guerra. Una teoría atribuye las guerras al armamento. Otra teoría opuesta dice que el armamento sólo es un síntoma del conflicto de ambiciones e ideales. En el ejemplo anterior, hemos explorado las implicaciones de una «guerra fría»; en el ejemplo siguiente, extendemos nuestra discusión desde el conflicto hasta el combate, a una «guerra caliente». El ejército **X**, que tiene 10000 soldados, está a punto de atacar al ejército **Y**, que sólo tiene 5000 soldados. Sin embargo, el ejército **Y** tiene un equipo militar superior, lo que hace que cada soldado **Y** sea 1,5 veces más efectivo que un soldado **X**.

La Figura 2.8.2 contiene el modelo visual, el modelo matemático y la solución al modelo matemático. Vemos que nuestro Modelo de Batalla es de realimentación positiva de segundo orden, lo mismo que el Modelo de Carrera de Armamentos 2 de la Figura 2.8.1, con la diferencia

L $AMA.K = AMA.J + (DT) (ADS.JK)$
 N $AMA = AMAN$
 NOTE AMA - RECURSOS MILITARES AMERICANOS (\$)
 C $AMAN = 1.2E12$
 NOTE $AMAN$ - RECURSOS MILITARES AMERICANOS EN 1960 (\$)
 R $ADS.KL = PABDTA * (AMA.K/AVRT) + PABDTR * SMA.K/AVRT$
 NOTE ADS - PRESUPUESTO AMERICANO DE DEFENSA (\$/AÑO)
 C $AVRT = 20$
 NOTE $AVRT$ - TIEMPO DE REDUCCION DE LA VULNERABILIDAD AMERICANA (AÑO)
 C $PABDTA = 1$
 NOTE $PABDTA$ - PERCEPCION REARME AMERICANO DEBIDO A ACCION (PROBABILIDAD)
 C $PABDTR = 0$
 NOTE $PABDTR$ - PERCEPCION REARME AMERICANO DEBIDO A REACCION (PROBABILIDAD)
 L $SMA.K = SMA.J + (DT) (SDS.JK)$
 N $SMA = SMAN$
 NOTE SMA - RECURSOS MILITARES SOVIETICOS (\$)
 C $SMAN = 1.0E12$
 NOTE $SMAN$ - RECURSOS MILITARES SOVIETICOS EN 1960 (\$)
 R $SDS.KL = PSBDTA * (SMA.K/SVRT) + PSBDTR * AMA.K/SVRT$
 NOTE SDS - PRESUPUESTO SOVIETICO DE DEFENSA (\$/AÑO)
 N $SVRT = AVRT * ASGNPR * FAGNPD/FSGNPD$
 NOTE $SVRT$ - TIEMPO DE REDUCCION DE LA VULNERABILIDAD SOVIETICA (AÑOS)
 C $ASGNPR = 2$
 NOTE $ASGNPR$ - RATIO DEL PNB AMERICANO AL SOVIETICO (ADIMENSIONAL)
 C $FAGNPD = 0.05$
 NOTE $FAGNPD$ - FRACCION DEL PNB AMERICANO DEDICADO A DEFENSA (ADIMENSIONAL)
 C $FSGNPD = 0.1182$
 NOTE $FSGNPD$ - FRACCION DEL PNB SOVIETICO DEDICADO A DEFENSA (ADIMENSIONAL)
 C $PSBDTA = 1$
 NOTE $PSBDTA$ - PERCEPCION REARME SOVIETICO DEBIDO A ACCION (PROBABILIDAD)
 C $PSBDTR = 0$
 NOTE $PSBDTR$ - PERCEPCION REARME SOVIETICO DEBIDO A REACCION (PROBABILIDAD)



- DIAGRAMA CAUSAL -

VALORES DE LOS PARAMETROS PARA LA HIPOTESIS 1
 $PABDTA = 1, PABDTR = 0$
 $PSBDTA = 1, PSBDTR = 0$
 ANALISIS DEL BUCLE AMA - ADS
 $\frac{d AMA_t}{dt} = ADS_t = \frac{AMA_t}{AVRT}$
 $AMA_t = AMAN * e^{t/AVRT}$
 ANALISIS DEL BUCLE SMA - SDS
 $\frac{d SMA_t}{dt} = SDS_t = \frac{SMA_t}{SVRT}$
 $SMA_t = SMAN * e^{t/SVRT}$
 En 1980 ($t = 20$), $SMA_t = AMA_t$
 $AMAN / SMAN = e^{t/SVRT} - e^{t/AVRT}$
 $t = \ln \frac{AMAN}{SMAN} + t$
 $SVRT = \ln \frac{AMAN}{SMAN} + t$
 $FSGNPD = ASGNPR * FAGNPD * (\ln \frac{AMAN}{SMAN} + 1)$
 $FSGNPD = 0.1182$

VALORES DE LOS PARAMETROS PARA LA HIPOTESIS 2
 $PABDTA = 0, PABDTR = 1$
 $PSBDTA = 0, PSBDTR = 1$
 PLANTEAMIENTO DE ECUACs. DIFERENC. 1º ORDEN
 $dAMA_t / dt = ADS_t = SMA_t / AVRT$
 $dSMA_t / dt = SDS_t = AMA_t / SVRT$
 PLANTEAMIENTO DE ECUACs. DIFERENC. 2º ORDEN
 $d^2 SMA_t = 1 \quad \frac{dAMA_t}{dt} = \frac{SMA_t}{SVRT * AVRT}$
 SOLUCION DE ECUACIONES DIFERENCIALES
 $SMA_t = C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t}$
 EVALUACION DE ω
 $\omega = (SVRT * AVRT)^{-1/2}$
 EVALUACION DE C_1 Y C_2
 $C_1 = (SMAN + AMAN * AVRT / SVRT) / 2$
 $C_2 = (SMAN - AMAN * AVRT / SVRT) / 2$
 $C_2 = 0$ si $SMA_t / AMA_t = SMAN / AMAN$
 $SVRT / AVRT = AMAN / SMAN$
 $FSGNPD = ASGNPR * FAGNPD * \left[\frac{AMAN}{SMAN} \right]^2$
 $FSGNPD = 0.0694$

- ECUACIONES DYNAMO -

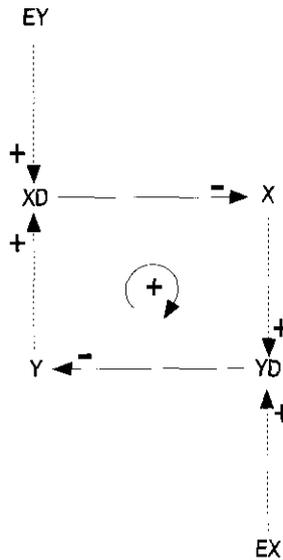
- HIPÓTESIS 1 -

- HIPÓTESIS 2 -

Figura 2.8.1 - MODELO DE CARRERA DE ARMAMENTO -

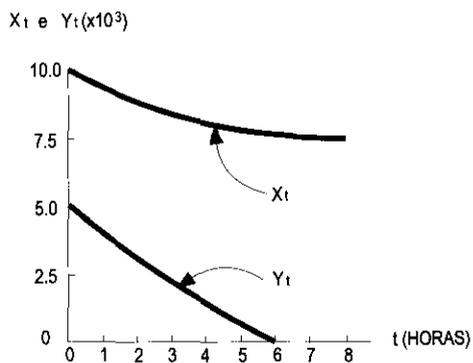
EL EJERCITO X (10000 HOMBRES) ATACA AL EJÉRCITO Y (5000 HOMBRES). EL EJÉRCITO Y, SIN EMBARGO, TIENE UN ARMAMENTO SUPERIOR, POR LO QUE UN SOLDADO Y ES 1,5 VECES MÁS EFECTIVO QUE UN SOLDADO X. POR TANTO, EN TÉRMINOS MEDIOS, CADA SOLDADO Y MATA A 0,15 SOLDADOS X POR HORA; CADA SOLDADO X MATA A 0,1 SOLDADOS Y POR HORA.

(a) - DESCRIPCIÓN VERBAL -



L $X.K = X.J - (DT) (XD.JK)$
 N $X = XN$
 NOTE X - NUMERO DE SOLDADOS EN EL EJERCITO X
 C $XN = 10000$
 NOTE XN - NUMERO INICIAL DE SOLDADOS X
 R $XD.KL = EY * Y.K$
 NOTE XD - MUERTOS EN EL EJERCITO X
 C $EY = 0.15$
 NOTE EY - EFECTIVIDAD DEL EJERCITO Y
 L $Y.K = Y.J - (DT) (YD.JK)$
 N $Y = YN$
 NOTE Y - NUMERO DE SOLDADOS EN EL EJERCITO Y
 C $YN = 5000$
 NOTE YN - NUMERO INICIAL DE SOLDADOS Y
 R $YD.KL = EX * X.K$
 NOTE YD - MUERTOS EN EL EJERCITO Y
 C $EX = 0.10$
 NOTE EX - EFECTIVIDAD DEL EJERCITO X

(b) - DIAGRAMA CAUSAL -



(d) - RESULTADOS GRÁFICOS -

(c) - ECUACIONES DYNAMO -

$$\begin{aligned} \frac{dX_t}{dt} &= -XD_t = -EY * Y_t \\ \frac{dY_t}{dt} &= -YD_t = -EX * X_t \\ \frac{d^2 X_t}{dt^2} &= -EY * \frac{dY_t}{dt} = EX * EY * X_t \\ X_t &= C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t} \text{ donde } \omega = \sqrt{EX * EY} \\ C_1 &= (XN - EY * YN / \omega) / 2 = 1938 \\ C_2 &= (XN + EY * YN / \omega) / 2 = 8062 \\ \left. \begin{aligned} X_t &= 1938 e^{0.1225t} + 8062 e^{-0.1225t} \\ Y_t &= -1583 e^{0.1225t} + 6583 e^{-0.1225t} \end{aligned} \right\} X \text{ GANA} \\ E_n Y_t &= 0, e^{0.245t} = 4.158 \\ t &= \ln(4.158 / 0.245) = 5.82 \text{ HORAS} \\ X(t = 5.82) &= 3953 + 3953 = 7906 \end{aligned}$$

(e) - SOLUCIÓN ANALÍTICA -

Figura 2.8.2 - MODELO DE BATALLA -

importante de que un modelo genera crecimiento exponencial de las dos variables de nivel y el otro genera decrecimiento exponencial. Este último tipo de modelos de realimentación positiva de segundo orden que contienen «rates-out» (tasas de salida) en vez de «rates-in» (tasas de entrada), se llama modelo de atrición.

2.9 Bucles negativos de segundo orden con bucles de primer orden

Consideremos la interdependencia de dos especies, la primera de las cuales sirve de comida para la segunda. Para que la discusión sea más objetiva, supongamos que la primera especie es de ciervos y la segunda de lobos. Los modelos de este tipo se denominan modelos de presa-depredador y son de interés para analizar el equilibrio ecológico. Otra clase similar de modelos son los de víctima-parásito, en que el ganado es una de las especies y la mosca tsetsé es la otra. El objetivo de este modelo es investigar la difusión de la tripanosomiasis y su impacto sobre la industria ganadera, el desarrollo económico, y la ecología de Africa.

La clave para el desarrollo del Modelo de Control e Impacto de la Mosca Tsetsé en la Figura 2.9.1 es la identificación de la estructura básica de realimentación. Consideremos a la primera especie en aislamiento. Si no existen moscas para infectar al ganado, la población ganadera aumentará a un ritmo proporcional a su número y fertilidad. Análogamente, el ritmo de descenso de la población de moscas depende de su número y mortalidad natural. Habiendo considerado las especies por separado, ahora tenemos que tomar en cuenta su interacción. Es lógico suponer que el número de encuentros entre el ganado y las moscas es proporcional al producto de las dos poblaciones. En la Figura 2.9.1. se desarrolla y analiza este modelo.

Una versión muy ampliada del modelo en la Figura 2.9.1 fue desarrollada para el Programa de Tripanosomiasis de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) de las Naciones Unidas.

Mediante la simulación, se evaluaron las estrategias para resolver el problema en Africa; éstas se centraban en la enfermedad, el parásito (el tripanosomo), el agente (la mosca) y la víctima (el ganado). Quedó claro que ninguna técnica aislada de control era ideal. Se necesita un concepto integrado de control de la mosca tsetsé, en el que se combinen varias técnicas para maximizar la eficacia del control en una región específica. Se llegó a la conclusión de que el concepto integrado de control de la enfermedad y de la mosca debe ser diseñado en conjunción con el modo de uso de la tierra, hecho posible por los efectos del control.

2.10 Bucles positivos de segundo orden con bucles de primer orden

Mientras que el ejemplo clásico de realimentación negativa de segundo orden con bucles de primer orden es el del modelo presa-depredador, el ejemplo clásico de realimentación positiva de segundo orden con bucles de primer orden es el del modelo de depredador-depredador. En esta interpretación, las especies depredadoras compiten entre sí, como los leones y las hienas que cazan las mismas presas, de modo que es frecuente que los de una especie maten a los de la otra. A veces esta competición se ve reflejada en el cuerpo humano, en la lucha que libran los carcinógenos y el sistema inmunológico.

Con la ingeniería genética, es posible crear organismos anticancerosos, **ACO**, capaces de buscar y atacar lesiones malignas específicas en el cuerpo humano. Este tipo de **ACO** le sería inyectado a una persona y combatiría las células cancerosas para: (1) retardar su crecimiento; (2) neutralizar su efecto; o (3) destruirlas completamente. Consideremos el Modelo de Tratamiento del Cáncer en la Figura 2.10.1.

Son de interés el valor de los niveles, las células cancerosas y el organismo anticanceroso en el tiempo t para una dosis específica, cuando muere el paciente, y la dosis necesaria cuando $t = 0$ para lograr la remisión.

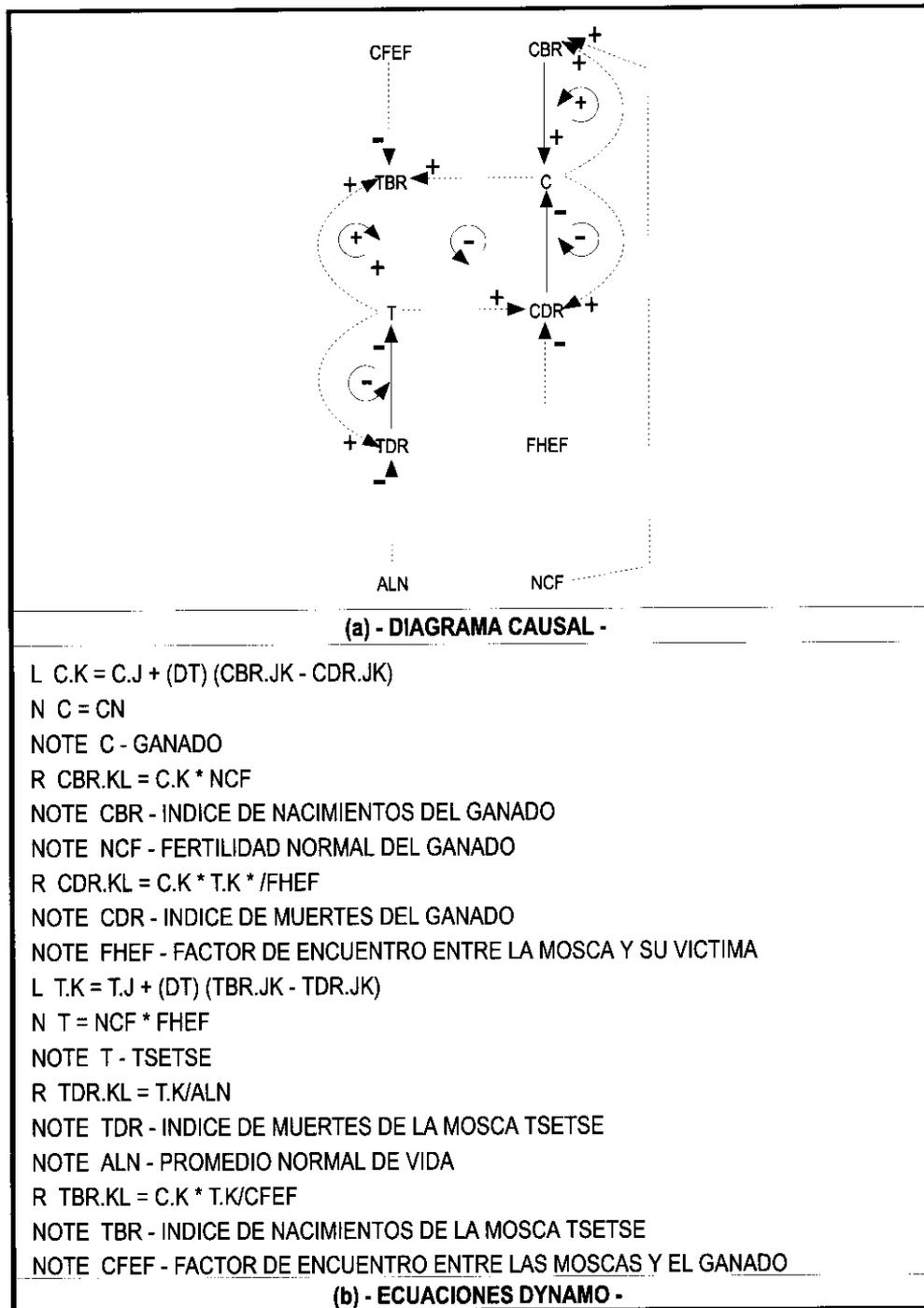


Figura 2.9.1 - MODELO DE CONTROL E IMPACTO DE LA MOSCA TSETSE -

1. ANALISIS DE ESTADO ESTACIONARIO

$$CBR_e = CDR_e$$

$$C_e * NCF = C_e * T_e / FHEF$$

$$T_e = NCF * FHEF$$

$$TBR_e = TDR_e$$

$$C_e * T_e / CFEF = T_e / ALN$$

$$C_e = CFEF / ALN$$

2. ECUACIONES DIFERENCIALES

$$dC_i / dt = CBR_i - CDR_i$$

$$dC_i / dt = C_i(T_e - T_i) / FHEF$$

$$dT_i / dt = TBR_i - TDR_i$$

$$dT_i / dt = T_i(C_i - C_e) / CFEF$$

3. SUPONGAMOS QUE $U_i = C_i - C_e$ y $V_i = T_i - T_e$

$$dU_i / dt = (U_i + C_e)(-V_i) / FHEF$$

$$dV_i / dt = (V_i + T_e)(U_i) / CFEF$$

4. TRATANDO LAS PARTES LINEALES COMO EXACTAS

$$dU_i / dt = -C_e V_i / FHEF$$

$$dV_i / dt = T_e U_i / CFEF$$

5. ECUACIONES DIFERENCIALES DE 2º ORDEN

$$\frac{d^2 U_i}{dt^2} = -\frac{C_e}{FHEF} \frac{dV_i}{dt} = -\frac{NCF}{ALN} U_i$$

6. SOLUCION GENERAL Y DERIVADAS

$$U_i = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t$$

$$dU_i / dt = C_1 \omega \cos \omega t - C_2 \omega \sin \omega t$$

$$d^2 U_i / dt^2 = -C_1 \omega^2 \sin \omega t - C_2 \omega^2 \cos \omega t$$

7. EVALUACION DEL PERIODO, $P = 2\pi / \omega$

$$P = 2\pi \sqrt{ALN / NCF}$$

8. EVALUACION DE C_1 Y C_2 en $t = 0$

$$C_1 = \frac{C_e (T_e - TN)}{\omega FHEF} = 0 \text{ Y } C_2 = CN - C_e$$

9. SOLUCION FINAL

$$C_i = C_e + (CN - C_e) \cos\left(\frac{2\pi}{P}t\right)$$

$$T_i = T_e + (K)(CN - C_e) \sin\left(\frac{2\pi}{P}t\right)$$

$$\text{donde } K = FHEF \sqrt{ALN * NCF} / CFEF$$

(c) - SOLUCIÓN ANALÍTICA -

Figura 2.9.1 - MODELO DE CONTROL E IMPACTO DE LA MOSCA TSETSE (Continuación) -

2.11 Realimentación negativa amortiguada de segundo orden

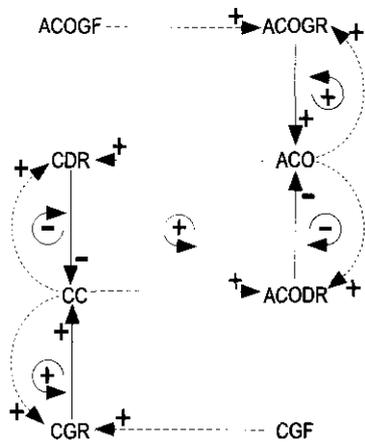
Hasta ahora los sistemas de realimentación negativa de segundo orden mencionados tienen las siguientes características: si inicialmente están en equilibrio, permanecen así; si no están en equilibrio inicialmente, oscilan indefinidamente alrededor del punto de equilibrio. Esto es aplicable a la cápsula del Tren Gravitacional (véase la Figura 2.7.1), al modelo de oferta-demanda (véase la Figura 2.7.2), y al modelo mosca tsetsé-ganado (véase la Figura 2.9.1). Sin embargo, muchos sistemas de realimentación negativa de segundo orden no siguen este tipo de comportamiento. Al contrario, su respuesta es una vuelta gradual al equilibrio y no una oscilación sostenida.

Para mostrar el comportamiento de una estructura de realimentación negativa de segundo orden amortiguada, usaremos el modelo de oferta-demanda tratado en la Figura 2.7.2, con la diferencia de que ahora ya no se supone que la demanda (índice de consumo) sea constante. En el análisis de este modelo ampliado de oferta-demanda, se considera un caso especial en el que la demanda es constante, para demostrar que se puede verificar el comportamiento descrito en la Figura 2.7.2 (véase la Figura 2.11.1).

2.12 Resumen

Los modelos de realimentación emplean dos tipos clave de variables para evitar ecuaciones simultáneas: niveles que representan el estado de alguna parte del sistema e índices que definen cuánto cambiarán los niveles durante el próximo intervalo de tiempo. Las cadenas de niveles alternos e índices pueden ser positivos, lo cual conduce a un crecimiento exponencial o a un colapso; o negativos, lo cual en el transcurso del tiempo conduce al equilibrio.

Hacer un modelo implica un proceso secuencial e iterativo. Comienza con la descripción verbal, que luego se traduce en un



(a) - DIAGRAMA CAUSAL -

L $CC.K = CC.J + (DT) (CGR.JK - CDR.JK)$
 N $CC = CCN$
 NOTE CC - CELULAS CANCEROSAS (mg)
 C $CCN = 1000$
 NOTE CCN - VALOR INICIAL DE CC (mg)
 R $CGR.KL = CC.K * CGF$
 NOTE CGR - INDICE DE CRECIMIENTO DEL CANCER (mg/DIA)
 C $CGF = 0.01$
 NOTE CGF - FACTOR DE CRECIMIENTO DEL CANCER (L/DIA)
 R $CDR.KL = CC.K * ACO.K * ACOCF$
 NOTE CDR - INDICE DE MUERTES DE CELULAS CANCEROSAS (mg/DIA)
 C $ACOCF = 0.005$
 NOTE $ACOCF$ - FACTOR DE CONTACTO CON ORGANISMOS ANTICANCEROSOS (L/mg - DIA)
 L $ACO.K = ACO.J + (DT) (ACOGR.JK - ACODR.JK)$
 N $ACO = ACON$
 NOTE ACO - ORGANISMOS ANTICANCEROSOS (mg)
 C $ACON = 1.0$
 NOTE $ACON$ - VALOR INICIAL DE ACO (mg)
 R $ACOGR.KL = ACO.K * ACOGF$
 NOTE $ACOGR$ - INDICE DE CRECIMIENTO DEL ACO (mg/DIA)
 C $ACOCF = 0.2$
 NOTE $ACOCF$ - FACTOR DE CRECIMIENTO DEL ACO (mg/DIA)
 R $ACODR.KL = ACO.K * CC.K * CCCF$
 NOTE $ACODR$ - INDICE DE MUERTES DE ACO (mg/DIA)
 C $CCCF = 0.025$
 NOTE $CCCF$ - FACTOR DE CONTACTO DE CELULAS CANCEROSAS (L/mg-DIA)

(b) - ECUACIONES DYNAMO -

---ANALISIS DE ESTADO ESTACIONARIO---

$$ACOGR_e = ACODR_e \quad CGR_e = CDR_e$$

$$CC_e = ACOGF / CCCF = 36 / 0.0002 = 1800 \quad ACO_e = CGF / ACOCF = 05 / 0.0025 = 20$$

---ECUACIONES DIFERENCIALES DE 1º ORDEN---

$$dACO_e / dt = ACOCR_e - ACODR_e = ACO_e (ACOGF - CCF - CC_e) \quad dCC_e / dt = CGR_e - CDR_e = CC_e (CGF - ACOCF - ACO_e)$$

$$\text{Sea } V_e / dt = ACO_e - ACO_e \quad \text{Sea } U_e = CC_e - CC_e$$

$$dV_e / dt = dACO_e / dt = (V_e + ACO_e) [ACOGF - CCF - (U_e + CC_e)] \quad dU_e / dt = dCC_e / dt = (U_e + CC_e) [CGF - ACOCF (V_e + ACO_e)]$$

$$dV_e / dt = -CCCF - ACO_e - U_e \text{ (TOMANDO SOLO LAS PARTES LINEALES)} \quad dU_e / dt = -ACOCF - CC_e - V_e \text{ (TOMANDO SOLO LAS PARTES LINEALES)}$$

---ECUACIONES DIFERENCIALES DE 2º ORDEN---

$$d^2 U_e / dt^2 = -ACOCF - CC_e \quad dV_e / dt = ACOGF - CGF - U_e$$

$$U = C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t}$$

$$dU_e / dt = C_1 \omega e^{\omega t} - C_2 \omega e^{-\omega t} = -ACOCF - CC_e - V_e$$

$$d^2 dU_e / dt^2 = C_1 \omega^2 e^{\omega t} + C_2 \omega^2 e^{-\omega t} \quad \omega^2 * ACOGF * CGF = 36 * 05 * 018$$

---EVALUACION DE C_1 Y C_2 ---

$$C_1 = [(CCN - CC_e) - ACOCF * CC_e * (ACON - ACO_e) / \omega] / 2 = +19$$

$$C_2 = [(CCN - CC_e) + ACOCF * CC_e * (ACON - ACO_e) / \omega] / 2 = -619$$

---SOLUCION DE CC_e ---

---SOLUCION DE ACO_e ---

$$CC_e = CC_e + C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t} \quad ACO_e = ACO_e - [(C_1 \omega) / (ACOCF * CC_e)] e^{\omega t} + [(C_2 \omega) / (ACOCF)]$$

$$CC_e \text{ AT } t = 20 \quad ACO_e \text{ AT } t = 20$$

$$CC_e = 1800 + 19 e^{0.134 * 20} - 619 e^{-0.134 * 20} = 1800 + 277.1 - 42.4 = 2034.7 \quad ACO_e = 20 - 566 e^{0.134 * 20} - 18.43 e^{-0.134 * 20} = 20 - 8252 - 1.264 = 10.48$$

AVERIGUAR CUANDO MUERE EL PACIENTE (CUANDO $CC_e = 1000\text{mg}$)

$$\text{RESOLVIENDO } 19 e^{0.134t} - 619 e^{-0.134 * 20} - 2200 = 0 \text{ da } t = 35.5 \text{ DIAS}$$

HALLAR LA DOSIS DE ORGANISMOS ANTICANCEROSOS EN $t = 0$ PARA LOGRAR LA REMISION

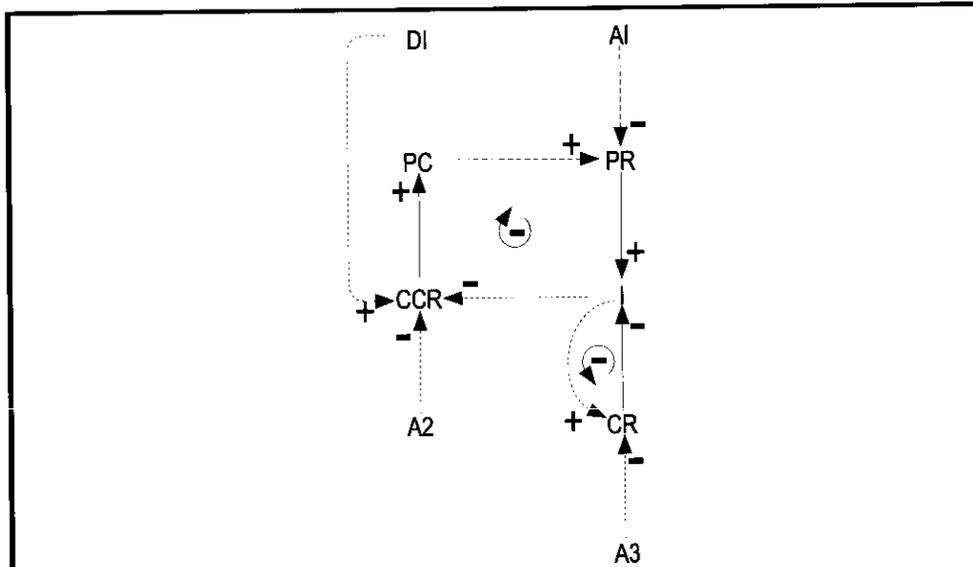
$$CC_e \rightarrow CC_e \text{ si } CC_e = 0 \quad ACON = 20 - 17.87 = 2.13\text{mg}$$

(c) - SOLUCIÓN ANALÍTICA -

Figura 2.10.1 - MODELO DE TRATAMIENTO DEL CÁNCER -

diagrama causal, a partir del cual se escriben las ecuaciones del sistema. El modelo se somete a crítica, se revisa, se critica de nuevo y así sucesivamente, en un proceso iterativo que continúa mientras siga siendo útil.

El diagrama causal en la dinámica de sistemas cumple con dos funciones. En primer lugar, facilita la escritura de las ecuaciones del sistema. En segundo lugar, en el caso de los modelos de gran alcance como los que se muestran en el Capítulo 3, el diagrama causal sirve como un «gestalt» (figura o forma) de comunicación, con la que se indica el modo en que una entidad física, experiencia o fenómeno ha sido construido o hecho. Con gráficos es posible hacer una declaración conceptual sobre un problema complejo, en la que se identifica su estructura, elementos e interacciones. El significado de la herramienta para generar diagramas causales en nuestro método de desarrollo de modelos es lo que nos saca de un callejón sin salida en las comunicaciones, con lo cual se dispone de un vocabulario y de una estructura de razonamiento comunes entre individuos, profesiones, especialistas, administradores y culturas. Hagamos una analogía: la descripción verbal juega el papel de la lectura de una larga y detallada novela victoriana, mientras que el diagrama causal es como una película basada en la novela. Una imagen vale más que mil palabras.



(a) - DIAGRAMA CAUSAL -

$$L \ I.K = I.J + (DT) (PR.JK - CR.JK)$$

$$N \ I = X * DI$$

NOTE I - INVENTARIO (UNIDADES)

$$N \ DI = D * DC$$

NOTE DI - INVENTARIO DESEADO (UNIDADES)

NOTE D - DEMANDA (UNIDADES/MES)

NOTE DC - COBERTURA DESEADA (MESES)

$$R \ PR.KL = PC.K / AI$$

NOTE PR - INDICE DE PRODUCCION (UNIDADES/MES)

$$L \ PC.K = PC.J + (DT) (CCR.JK)$$

$$N \ PC = DPC$$

NOTE PC - CAPACIDAD DE PRODUCCION (UNIDADES/MES)

$$N \ DPC = D * AI$$

NOTE DPC - MAXIMO DESEADO DE PRODUCCION (UNIDADES/ MES)

$$R \ CCR.KL = (DI - I.K) / A2$$

NOTE CCR - INDICE DE CAMBIO DE CAPACIDAD (UNIDADES/MES-MES)

$$N \ A2 = CCD * DI / DPC$$

NOTE CCD - DESFASE EN EL CAMBIO DE CAPACIDAD (MESES)

$$R \ CR.KL = I.K / A3 \text{ DONDE } A3 = DC$$

NOTE CR - INDICE DE CONSUMO (UNIDADES/MES)

(b) - ECUACIONES DYNAMO -

Figura 2.11.1 - MODELO AMORTIGUADO DE OFERTA-DEMANDA -

$$I(s) = \frac{IN*s + DPC/A1 + D1*\omega^2/s}{s^2 + 2\alpha s + \omega^2}$$

$$\text{donde } \alpha = \zeta\omega = 1/2A3 \text{ y } \omega^2 = 1/A1.A2$$

$$\text{desde } DPC = D.A1 = D1.A1/A3$$

$$H(s) = \frac{s * X * D1 + D1/A3 + D1 - \omega^2/s}{(s + \alpha)^2 + \omega^2 - \alpha^2} = \frac{(s + \alpha) X * D1}{(s + \alpha)^2 + \omega^2 - \alpha^2} + \frac{X * D1(2/X) - 1\alpha}{(s + \alpha)^2 + \omega^2 - \alpha^2} + \frac{D1 * \omega^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2)}$$

$$I_t = (X * D1) e^{-\alpha t} \cos \sqrt{\omega^2 - \alpha^2} t + \frac{X * D1((2/X) - 1)\alpha}{\sqrt{\omega^2 - \alpha^2}} e^{-\alpha t} \sin \sqrt{\omega^2 - \alpha^2} t + D1 \left[1 - \frac{e^{-\zeta\omega t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega \sqrt{1 - \zeta^2} t + \cos^{-1} \zeta) \right]$$

$$\text{periodo} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{1 - \zeta^2}} = 77.3 \text{ meses}$$

$$\text{para } \zeta = \alpha = 0, I_t = D1(X \cos \omega t + 1 - \cos \omega t) \text{ y periodo} = 2\pi / \omega$$

$$CCR_e = 0 \quad PR_e = CR_e$$

$$\frac{D1 - I_e}{A2} = 0 \quad PC_e/A1 = I_e/A3$$

$$PC_e/A1 = D1/DC = D$$

$$I_e = D1 \quad PC_e = D * A1 = DPC$$

$$\frac{dI_t}{dt} = PR_t - PC = \frac{PC_t}{A1} - \frac{I_t}{A3}$$

$$\frac{dPC_t}{dt} = CCR_t = \frac{D1}{A2} - \frac{I_t}{A2}$$

$$sI(s) - IN = \frac{PC(s)}{A1} - \frac{I(s)}{A3}$$

$$sPC(s) - DPC = \frac{D1 I}{A2 s} - \frac{I(s)}{A2}$$

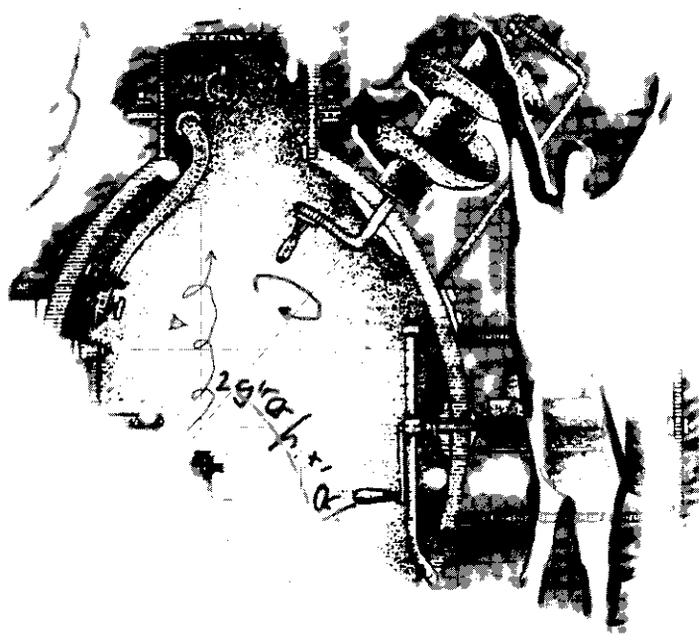
$$PC(s) = \frac{DPC}{s} + \frac{D1 I}{A2 s^2} - \frac{I(s)}{A2 s}$$

(c) - SOLUCIÓN ANALÍTICA -

Figura 2.11.1 - MODELO AMORTIGUADO DE OFERTA-DEMANDA (Continuación) -

3

Desarrollo inducido por las infraestructuras



3.1 Introducción

A donde va la gente siguen las obras públicas, y viceversa. Debe existir un suministro adecuado de agua limpia potable junto con un sistema de alcantarillado para los desperdicios. Una red de transporte con autopistas, puentes, aeropuertos y ferrocarriles hace que las ciudades sean accesibles entre sí, mientras que las calles y el transporte público permiten el movimiento dentro de las ciudades. Las obras públicas, no obstante, no están confinadas a las zonas urbanas; se extienden mucho más allá e incluyen carreteras rurales, presas, centrales de energía, sistemas de irrigación, líneas eléctricas y otras. Esta base de instalaciones públicas esenciales, que hace posible que una nación funcione, se denomina «infraestructura». Por lo que respecta a esta monografía, se pueden definir las infraestructuras como las instalaciones físicas de un país, región o localidad, y que dependen de decisiones de la Administración para su planificación, diseño, construcción, funcionamiento, mantenimiento y administración.

El desarrollo es un proceso complejo a través del cual una sociedad se esfuerza para lograr un mayor control sobre su destino. La relación entre infraestructuras y desarrollo es un tema de considerable interés teórico e importancia práctica, el cual ha recibido una gran atención a lo largo de muchos años, tanto en países avanzados como en los menos desarrollados. La interacción entre el nivel y la evolución de los recursos de infraestructura y el nivel medio de la población en una zona es un factor crítico que afecta al progreso

económico y social, y debe ser tenido en cuenta en todas las fases de la planificación del desarrollo nacional y regional. En los países avanzados, se prestó mucha atención a la innovación de las infraestructuras durante los años iniciales del crecimiento industrial; hoy, las nuevas estrategias de la planificación económica requieren el cambio o renovación de los sistemas de infraestructura heredados. En los países menos desarrollados existe una gran preocupación por las infraestructuras, en el contexto de promover un desarrollo económico rápido.

3.2 Necesidades y método

Está surgiendo un cuerpo de comportamiento dinámico y de principios de estructura que nos permite organizar y comprender el proceso de desarrollo de una región o de un país entero, un proceso dominado por la realimentación en el que juega un papel preponderante la síntesis de las funciones de oferta y demanda. Para la función de demanda, buscamos la mejora de las infraestructuras necesarias para acomodar una cierta carga socio-económica; para la función de oferta, queremos hallar el nivel de servicio obtenido a partir de una cierta mejora en las infraestructuras. Puesto que los niveles más elevados de servicios atraen la actividad socio-económica, se cierra el bucle de realimentación [9].

Los sistemas de infraestructura están estrechamente relacionados con las características básicas de la sociedad. Constituyen la base de la distribución de la población, la planificación y el desarrollo del uso del suelo, el crecimiento económico regional y local, la productividad industrial y la calidad de vida. Los ejemplos siguientes ilustran problemas y oportunidades socio-económicas importantes [10]:

- Las tecnologías para el diseño, construcción y mantenimiento de infraestructuras deben evaluarse en función de su impacto social y de sus beneficios socio-económicos. Hay que dedicar
-

esfuerzos a la evaluación de alternativas, y a la elección de prioridades para el desarrollo de tecnologías de infraestructuras.

- Es necesario comprender el impacto de la disminución de la capacidad de las infraestructuras civiles en la vida de la comunidad, en la productividad industrial y en la economía regional.
- Deben establecerse métodos racionales para determinar las prioridades en la asignación de recursos.
- Es necesario comprender mejor los efectos interactivos entre los sistemas de infraestructura debidos a su interdependencia (tales como la energía eléctrica, el suministro de agua y los sistemas de transporte local).

Los objetivos de este Capítulo de la monografía son sugerir aplicaciones de nuestra metodología de dinámica de sistemas aplicada para generar modelos que puedan ser utilizados por planificadores y gestores como herramientas para: (1) hacer estimaciones seguras de los beneficios de la productividad y de las mejoras económicas debidas a inversiones y utilidades potenciales de infraestructuras; y (2) relacionar entre sí las inversiones en infraestructuras, los beneficios de los usuarios y el desarrollo económico subsiguiente, con lo que obtener una base para el desarrollo de políticas racionales. Básicamente, el análisis del impacto de la infraestructura es un intento de contestar a la cuestión siguiente: ¿cuál sería el impacto económico **A**, el impacto social **B**, el impacto demográfico **C**, el impacto sobre el uso del suelo **D**, el impacto medioambiental **E** y el beneficio para los usuarios **F**, en una zona geográfica **G**, resultantes de una inversión en infraestructuras **H** en un tiempo **T**? La necesidad de esta metodología sobre el impacto de las infraestructuras está documentada en otro artículo [11]. En las próximas Secciones se ilustrará este método tanto a nivel nacional como regional.

3.3 Sistemas para el desarrollo de modelos regionales

El impacto de las infraestructuras sobre el desarrollo nacional se centra normalmente en las regiones del país. Las regiones seleccionadas frecuentemente para el desarrollo socio-económico incluyen cuencas de ríos, regiones fronterizas, regiones deprimidas y áreas metropolitanas. Las iniciativas más comunes de infraestructura incluyen sistemas de transporte, recursos de agua y de energía eléctrica. Consideremos la relación entre uno de estos sistemas de infraestructura, el transporte, y una de las categorías regionales, las ciudades.

El transporte es verdaderamente el flujo sanguíneo de la comunidad urbana, porque la interdependencia espacial es la base misma de una zona urbana. Un sistema de transporte determinado influye sobre la localización de las actividades en una ciudad, y es a su vez influido por la localización de estas actividades, porque cada distribución geográfica supone un conjunto de necesidades de viajes al que se satisface por medio de decisiones de inversión y de operación dentro del sistema de transporte. A pesar de esta importancia estratégica, desafortunadamente, hay varias razones por las que el sistema se aleja del uso eficaz de los recursos: economías de escala, la toma mixta de decisiones de la Administración y del sector privado, y la ausencia de decisiones coordinadas relativas al conjunto del área metropolitana afectada y de los distintos modos de transporte. Antes de que se pueda modelizar el impacto del desarrollo de transportes, o del desarrollo regional o urbano, debe elaborarse primero un modelo del área regional o urbana, según sea necesario [12].

La región a modelizar se puede dividir arbitrariamente en dos categorías: (1) aquéllas relacionadas con la estructura socio-económica regional, tales como la población, y los sistemas industriales y residenciales; y (2) aquéllas que sirven a la comunidad regional y que se denominan los «sistemas tecnológicos regionales» tales como el suministro de agua, la energía, el transporte y el medio ambiente. El

conocimiento básico de cómo se constituyen los sistemas regionales y cómo interactúan entre sí proporciona la base para un proceso mejor de aprendizaje y, por consiguiente, un proceso mejorado de toma de decisiones. Debido a la interrelación de los sistemas regionales, una solución adecuada de los problemas de infraestructura y desarrollo apenas puede ser alcanzada, sin conocer sus posibles efectos sobre otros sistemas. La falta de comprensión de esta causalidad conduce normalmente al tratamiento de los síntomas en vez de las causas [13].

Con relación al diagrama causal en la Figura 3.3.1, vemos que el modelo de dinámica de sistemas para este sistema típico regional contiene seis sectores: un sector de población, un sector económico, un sector de empleo y los sectores de infraestructura de transporte, agua y energía. Aunque sencillo, este ejemplo muestra la razón por la que el desarrollo inducido por las infraestructuras no es una panacea. Hay dos flujos causales resultantes de las variables de decisión, NUMERO DE CARRILES y CAPACIDAD DEL EMBALSE, a la medida de efectividad, ÍNDICE DE DESEMPLEO, que tienden a compensarse entre sí. Obviamente, hacer modelos del desarrollo inducido por las infraestructuras a nivel mundial es un problema muy serio [13].

3.4 Modelo de las economías nacionales

Un modelo nacional de desarrollo debería, idealmente, estar estructurado de forma que pudiera alcanzar tres aspectos del desarrollo: (1) el desarrollo de los recursos; (2) el desarrollo regional; y (3) el desarrollo sectorial. Dentro de los recursos se incluyen los naturales, los territoriales, los hidrológicos, y los humanos (mano de obra). El desarrollo regional se organiza sobre la base de lo rural y lo urbano. Los sectores representados por el modelo son la agricultura, la industria manufacturera, el comercio, las infraestructuras y la administración pública. Evidentemente, estos tres aspectos del desarrollo se solapan entre sí. Además, están relacionados por los dos elementos que más influyen en el crecimiento: (1) la población,

incluidos los efectos de todos los factores económicos y medio-ambientales que influyen en las tasas de natalidad, mortalidad y migración; y (2) el capital, incluidos los medios para la producción de bienes industriales, de servicios y de productos agrícolas [12].

Se pueden considerar a muchos de los sectores de un modelo nacional/regional como elementos de las cuentas nacionales. En las cuentas nacionales se trata de medir la producción agregada originada en algunas zonas geográficas para obtener una visión de su actuación económica.

El resultado final de la actividad económica es la producción de bienes y servicios y la distribución de los mismos entre los miembros de la sociedad. La medida más completa de la producción nacional es el producto nacional bruto, que se suele abreviar con las siglas PNB. Este es el valor de todos los bienes y servicios producidos anualmente en el país. La estimación del PNB, sin embargo, no consiste simplemente en sumar el valor de toda la producción, porque esto implicaría una doble contabilización. Según nuestro método, el valor de cualquier producto es originado por un gran número de industrias diferentes; cada empresa compra materiales o suministros de otras empresas, los procesa o transporta y, por tanto, incrementa su valor.

Existen cuatro grandes componentes del PNB, cada uno de los cuales representa un uso final del mismo: el consumo, la inversión, las compras de las administraciones públicas y las exportaciones netas. La inversión hace referencia a esa parte de la producción final que consiste en inversión nueva o reposiciones de capital. Los gastos de las administraciones públicas en bienes y servicios son un segundo componente del PNB. Además, las administraciones públicas tienen otros gastos, como los «pagos de transferencia», los cuales no representan un aumento de la producción en sí y por tanto son excluidos del PNB. El consumo se refiere a la parte de la producción nacional que se dedica a satisfacer las necesidades del consumidor. Las exportaciones netas (es decir, la exportación menos la importación de

bienes y servicios) son un uso final del PNB y se deben incluir en el total. Tres de los cuatro componentes principales pueden ser agrupados bajo el encabezamiento de PIB (producto interior bruto): el consumo, la inversión y las compras públicas. Es evidente, por tanto, que el PNB es la suma del PIB y las exportaciones netas [14].

Con el fin de analizar los ingresos nacionales, las estadísticas del PNB se subdividen en categorías colectivas exhaustivas, mutuamente excluyentes. El esquema de subdivisión que se utiliza con más frecuencia está basado en el «International Standard Industrial Classification (ISIC)» (Clasificación Internacional Industrial Estándar). Las nueve categorías ISIC más importantes se enumeran en la Tabla 3.4.1.

Código	Clasificación y Descripción
1	Agricultura, caza, silvicultura y pesca
2	Minería y explotación de canteras
3	Manufacturas
4	Electricidad, gas y agua
5	Construcción
6	Comercio al por mayor y al por menor, y restauración y hostelería
7	Transporte, almacenamiento y comunicación
8	Financiación, seguros, sector inmobiliario y servicios empresariales
9	Servicios comunitarios, sociales y personales

Tabla 3.4.1 Clasificación Internacional Industrial Estándar

Cada una de las nueve categorías de producción económica ISIC de la Tabla 1 está asociada con un tipo específico de stock de capital. En un modelo típico, el sector agrícola aporta la mayor parte de la producción dentro de la primera categoría ISIC; el stock de capital de la industria manufacturera proporciona la producción de las

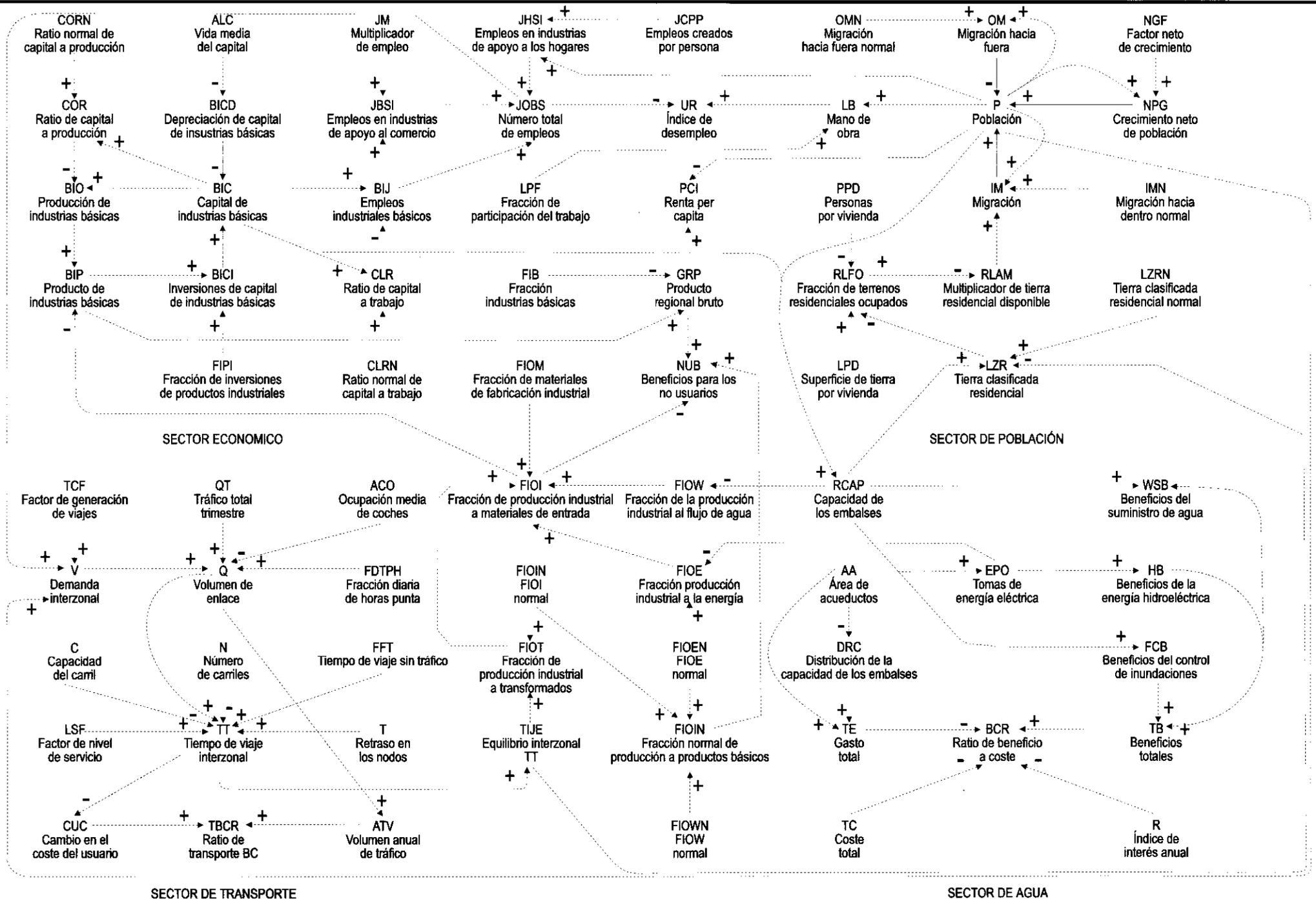


Figura 3.3.1 - MODELO DE DESARROLLO DE INFRAESTRUCTURA REGIONAL -

categorías ISIC 2 y 3; y el capital empresarial en el modelo se asocia con las actividades que se enumeran en las categorías ISIC 6 y 8. En el modelo, el sector de la infraestructura incluye el transporte y corresponde a las categorías ISIC 4 y 7, y el sector de los servicios públicos a la división ISIC 9 (véase Figura 3.4.1).

El Modelo de Desarrollo Nacional, representado en la Figura 3.4.1, está escrito en DYNAMO III, lo que facilita una mayor desagregación. Los componentes del Sector de Infraestructuras son las autopistas, los ferrocarriles, los puertos, los aeropuertos, el suministro de agua, la energía, las telecomunicaciones y la depuración de aguas residuales. El Sector de Desarrollo Social se divide en sanidad, educación, vivienda y asistencia familiar.

Se identifican cinco experimentos de política general: (1) apoyo público a la agricultura; (2) asignación pública a los servicios sociales; (3) política de desarrollo industrial; (4) política de desarrollo inducido por las infraestructuras; y (5) política de protección medioambiental. Los escenarios fueron ejecutados para cuatro países - Taiwán [15], Etiopía [16], Filipinas [17] y Japón [18] - eligiendo los valores de los parámetros para estos países.

3.5 Modelo de sistemas urbanos

Las técnicas básicas empleadas en la planificación, ingeniería y administración de ciudades son la intuición, las buenas intenciones, el sentido común y la experiencia. Aquéllos que triunfan parcialmente tienen a la vez sentido común y experiencia. No obstante, la toma de decisiones sobre zonas urbanas no tiene en cuenta los efectos a largo plazo de programas bien intencionados, y a menudo increíblemente caros, para mejorar la suerte de los habitantes de las ciudades. Más dinero por sí solo no mejorará la situación, y puede de hecho empeorarla al requerir todavía más dinero. Debe desarrollarse un conocimiento mayor de los sistemas urbanos.

En un sistema tan complejo como una ciudad, la intuición ha resultado ser una guía muy poco segura sobre las consecuencias probables de políticas bien intencionadas, simplemente porque la mente humana es incapaz de comprender un sistema que tiene tantas variables. No es sorprendente que las políticas, leyes y decisiones sobre zonas urbanas hayan tenido consecuencias completamente distintas de las previstas, yendo desde éxitos parciales hasta fallos trágicos. Con la tecnología actual, otro método para estudiar alternativas es la simulación por ordenador. No sólo es económico, sino que también es un instrumento conceptualmente potente que puede aumentar el papel de la razón en menoscabo de la emoción.

Para ilustrar la aplicación del método de dinámica de sistemas al desarrollo de modelos sobre las interacciones infraestructura/ desarrollo a nivel urbano, se presenta el modelo siguiente. «METRO» es un modelo de un área metropolitana consistente en una ciudad central y zonas periféricas. El modelo incluye siete sectores (población de la ciudad, industria, vivienda, empleo, suelo, zonas periféricas y transporte), los cuales serán descritos en el formato tradicional: verbalmente, diagrama causal (véase la Figura 3.5.1) y ecuaciones DYNAMO (véase la Figura 3.5.2).

Consideremos primero el Sector de Población de la ciudad central. La variable de nivel **C** para la Población de la Ciudad está controlada por dos tipos de tasas de cambio: crecimiento natural (nacimientos y defunciones) y la migración (hacia dentro y hacia fuera). Cada una de estas cuatro tasas dependen de la población y de las tasas fraccionarias constantes de crecimiento. No obstante, se supone que la inmigración está también influenciada por un «multiplicador de atracción». Mientras que hay muchas maneras de medir la actividad económica, las industrias han sido elegidas como la variable de nivel para el Sector Industrial. Las industrias crean más industrias por medio de la construcción de las mismas. La cuantía de la actividad económica adicional es proporcional al índice actual de actividad económica. Por tanto en cada instante de tiempo, la construcción de industrias es igual

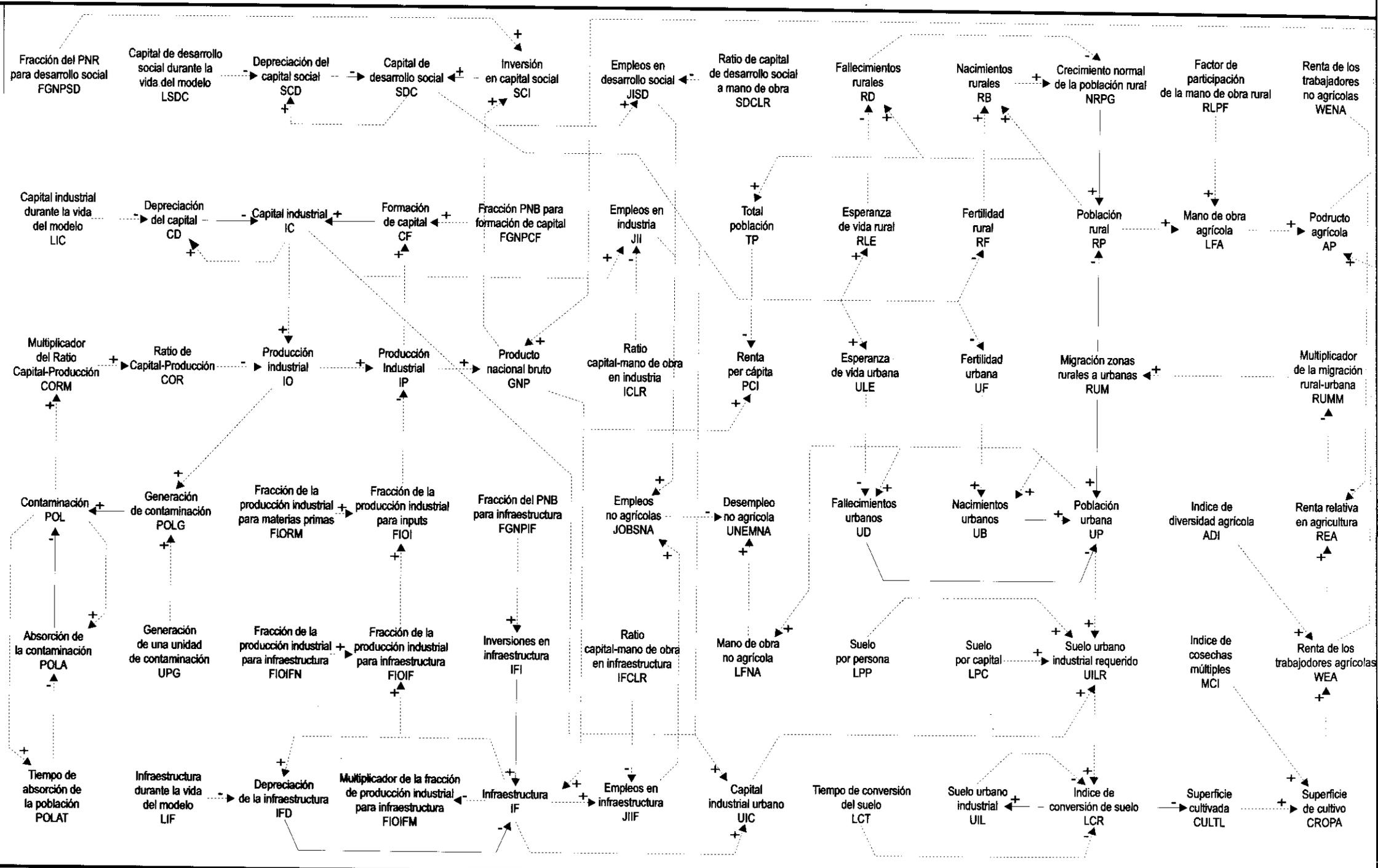


Figura 3.4.1 - MODELO DE DESARROLLO NACIONAL -

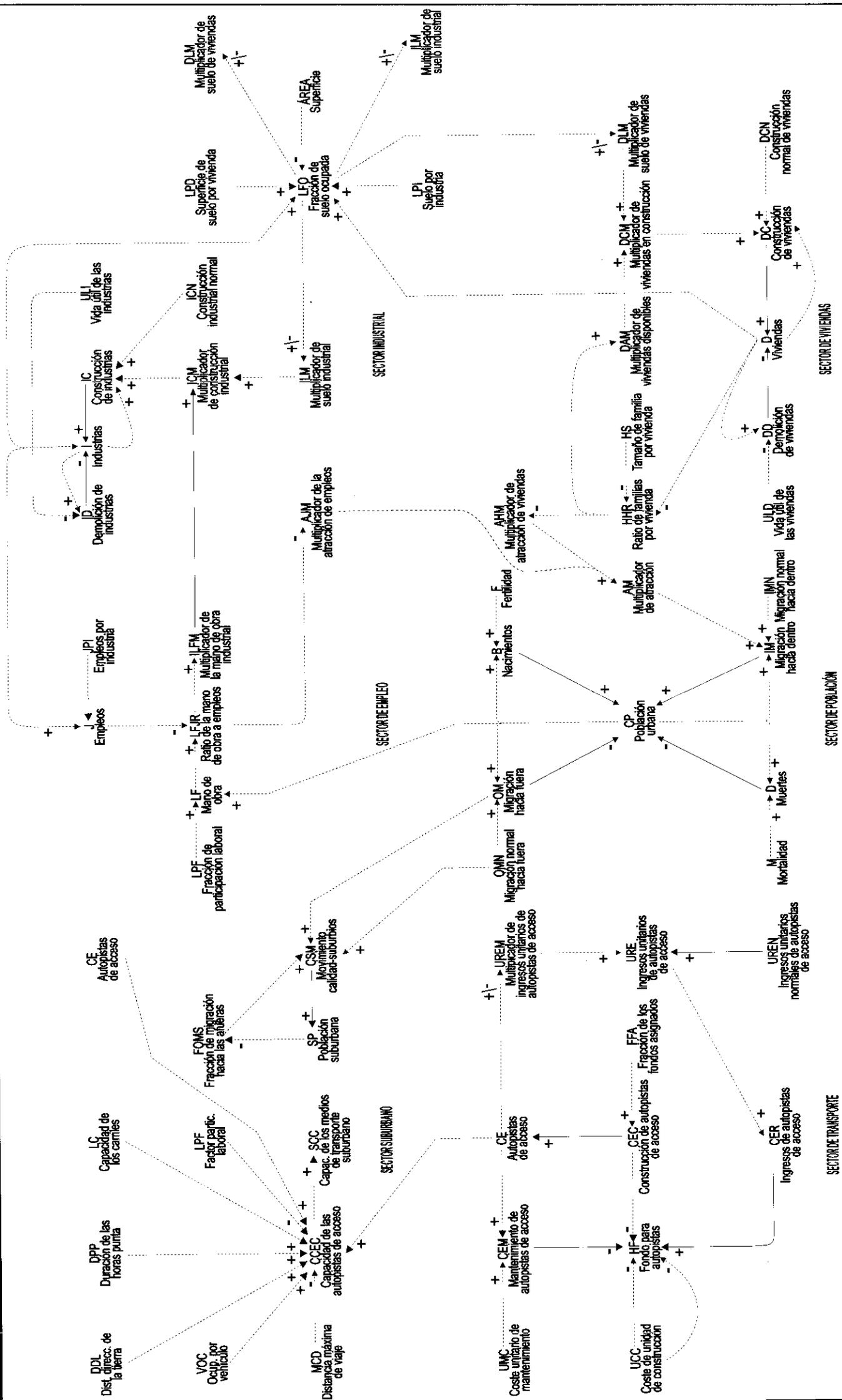


Figura 3.5.1 - DIAGRAMA CAUSAL DE MODELO METROPOLITANO -

al número de estructuras multiplicado por la «normal de construcción industrial», en donde la palabra normal designa las condiciones bajo las que tiene lugar la construcción. Las condiciones dentro del área urbana, tales como la disponibilidad de mano de obra y suelo que alientan o deprimen la construcción, respectivamente, por encima o por debajo de la fracción normal, son tenidas en cuenta por un multiplicador de construcción industrial [12].

El Sector de la Vivienda es tratado de forma similar al Sector Industrial, aunque la unidad estructural básica es la «vivienda» en vez de la «industria». El Sector del Empleo relaciona directamente los sectores demográficos (Población) y económicos (Industria). La población determina el tamaño de la fuerza laboral, la «demanda» de empleo. La industria crea empleo, y representa el papel de la «oferta» en la interacción. En el Sector del Suelo, vemos como la industria y la vivienda compiten por el suelo. La disponibilidad del suelo influye en la expansión de la industria y la vivienda a través de los parámetros **ILM**, Multiplicador del Suelo Industrial, y **DLM**, Multiplicador del Suelo para Viviendas, respectivamente.

Es adecuado que hagamos aquí una pausa para considerar los cinco sectores como un sistema con interacciones dentro de y entre los sectores. La disponibilidad de empleos modula la migración hacia dentro y hacia fuera de una zona a través de un «multiplicador de atracción». La disponibilidad de la vivienda influye también en la construcción de viviendas, porque los constructores no pueden hacer beneficios construyendo y vendiendo casas para las que no existe demanda. Puede observarse que las estructuras de población e industriales están acopladas a través de un Ratio Mano de Obra/Empleo, población y vivienda a través de un Ratio Familia/Vivienda, y las estructuras industriales y viviendas a través de la Fracción de Suelo Ocupado.

Si la disponibilidad de empleos y viviendas es la causa principal de inmigración a nuestra hipotética área urbana, la accesibilidad de las residencias suburbanas a lugares de trabajo en el centro de la ciudad,

```

* METRO MODEL
NOTE
NOTE ***** SECTOR DE POBLACION *****
NOTE
L CP.K = CP.J + (DT)(B.JK + IM.JK - D.JK - OM.JK)
N CP = CPN
NOTE CP - POBLACION URBANA (PERSONAS)
C CPN = 290000
NOTE CPN - POBLACION URBANA INICIAL (PERSONAS)
R B.KL = CP.K * F
NOTE B - NACIMIENTOS (PERSONAS/AÑO)
C F = 0.03
NOTE F - FERTILIDAD (FRACCION/AÑO)
R D.KL = CP.K * M
NOTE D - MUERTES (PERSONAS/AÑO)
C M = 0.015
NOTE M - MORTALIDAD (FRACCION/AÑO)
R OM.KL = CP.K * OMN
NOTE OM - MIGRACION HACIA FUERA (PERSONAS/AÑO)
C OMN = 0.07
NOTE OMN - MIGRACION NORMAL HACIA FUERA (FRACCION/AÑO)
R IM.KL = CP.K * INM * AM.K
NOTE IM - MIGRACION HACIA DENTRO (PERSONAS/AÑO)
C IMN = 0.1
NOTE IMN - MIGRACION NORMAL HACIA DENTRO (FRACCION/AÑO)
A AM.K = AJM.K * AHM.K
NOTE AM - MULTIPLICADOR DE ATRACCION (ADIMENSIONAL)
NOTE
NOTE ***** SECTOR INDUSTRIAL *****
NOTE
L I.K = I.J + (DT) (IC.JK - ID.JK)
N I = IN
NOTE I - INDUSTRIAS (ESTRUCTURAS)
C IN = 4000
NOTE IN - INDUSTRIAS INICIALES (ESTRUCTURAS)
R IC.KL = I.K * ICN * ICM.K
NOTE IC - CONSTRUCCION DE INDUSTRIAS (ESTRUCTURAS/AÑO)
C ICM = 0.10
NOTE ICN - CONSTRUCCION NORMAL DE INDUSTRIAS (FRACCION/AÑO)
A ICM.K = ILM.K * ILFM.K
NOTE ICM - MULTIPLICADOR DE CONSTRUCCION INDUSTRIAL (ADIMENSIONAL)
R ID.KL = I.K/ULI
NOTE ID - DEMOLICION DE INDUSTRIAS (ESTRUCTURAS/AÑO)
C ULI = 40
NOTE ULI - VIDA UTIL DE INDUSTRIAS (AÑOS)

```

Figura 3.5.2 - ECUACIONES DYNAMO PARA MODELO METROPOLITANO -

A AJM.K = TABLE (AJMT, LFJR.K, 0, 2, 0.2)
 T AJMT = 2/1.95/1.8/1.6/1.35/1/0.5/0.3/0.2/0.15/0.1
 NOTE AJM - MULTIPLICADOR DE ATRACCION DE EMPLEO (ADIMENSIONAL)
 NOTE
 NOTE ***** SECTOR DE LA VIVIENDA *****
 NOTE
 L DW.K = DW.J + (DT) (DC.JK - DD.JK)
 N DW = DWN
 NOTE DW - VIVIENDAS (ESTRUCTURAS)
 C DWN = 56000
 NOTE DWN - VIVIENDAS INICIALES (ESTRUCTURAS)
 R DC.KL = DW.K * DCN * DCM.K
 NOTE DC - CONSTRUCCION DE VIVIENDAS (ESTRUCTURAS/AÑO)
 C DCN = 0.07
 NOTE DCN - CONSTRUCCION NORMAL DE VIVIENDAS (FRACCION/AÑO)
 A DCM.K = DLM.K * DAM.K
 NOTE DCM - MULTIPLICADOR DE CONSTRUCCION DE VIVIENDAS (ADIMENSIONAL)
 R DD.KL = DW.K/ULD
 NOTE DD - DEMOLICION DE VIVIENDAS (ESTRUCTURAS/AÑO)
 C ULD = 66.67
 NOTE ULD - VIDA UTIL DE VIVIENDAS (AÑOS)
 A DAM.K = TABLE (DAMT, HHR.K, 0, 2, 0.2)
 T DAMT = 0.2/0.25/0.35/0.5/0.7/1/1.35/1.6/1.8/1.95/2
 NOTE DAM - MULTIPLICADOR DE DISPONIBILIDAD DE VIVIENDAS (ADIMENSIONAL)
 A HHR.K = CP.X/(DW.K * HS)
 NOTE HHR - RATIO DE FAMILIAS A VIVIENDAS (ADIMENSIONAL)
 C HS = 4
 NOTE HS - TAMAÑO DE FAMILIAS (PERSONAS/ESTRUCTURA)
 A AHM.K = TABLE (AHMT, HHR.K, 0, 2, 0.2)
 T AHMT = 1.4/1.4/1.35/1.3/1.15/1/0.8/0.65/0.5/0.45/0.4
 NOTE AHM - MULTIPLICADOR DE ATRACCION DE VIVIENDAS (ADIMENSIONAL)
 NOTE
 NOTE ***** SECTOR DE EMPLEO *****
 NOTE
 A ILFM.K = TABLE (ILFMT, LFJR.K, 0, 2, 0.2)
 T ILFMT = 0.2/0.25/0.35/0.5/0.7/1/1.35/1.6/1.8/1.95/2
 NOTE ILFM - MULTIPLICADOR DE MANO DE OBRA INDUSTRIAL (ADIMENSIONAL)
 A LFJR.K = LF.K/J.K
 NOTE LFJR - RATIO DE MANO DE OBRA A EMPLEOS (ADIMENSIONAL)
 A LF.K = P.K * LPF
 NOTE LF - MANO DE OBRA (PERSONAS)
 C LPF = 0.50
 NOTE LPF - FRACCION DE PARTICIPACION DE TRABAJO (ADIMENSIONAL)
 A P.K = CP.K + SP.K
 NOTE P - POBLACION (PERSONAS)

Figura 3.5.2 - ECUACIONES DYNAMO PARA MODELO METROPOLITANO (Continuación) -

A $J.K = I.K * JPI$
 NOTE J - EMPLEOS (PERSONAS)
 C $JPI = 38$
 NOTE JPI - EMPLEOS / INDUSTRIA (PERSONAS/INDUSTRIA)
 S $UR.K = (LF.K - J.K)/LF.K$
 NOTE UR - INDICE DE DESEMPLEO (ADIMENSIONAL)
 NOTE
 NOTE ***** SECTOR DEL SUELO *****
 NOTE
 A $LFO.K = (LPI * I.K + LPD * DW.K)/AREA$
 NOTE LFO - FRACCION DE SUELO OCUPADA (ADIMENSIONAL)
 C $LPI = 1.0$
 NOTE LPI - SUELO POR INDUSTRIA (ACRES/ESTRUCTURA)
 C $LPD = 0.5$
 NOTE LPD - SUELO POR VIVIENDA (ACRES/ESTRUCTURA)
 C $AREA = 200000$
 NOTE AREA - SUPERFICIE (ACRES)
 A $ILM.K = TABLE (ILMT, LFO.K, 0, 1, 0.1)$
 T $ILMT = 1/1.15/1.3/1.4/1.45/1.4/1.3/0.9/0.5/0.25/0$
 NOTE ILM - MULTIPLICADOR DE SUELO INDUSTRIAL (ADIMENSIONAL)
 A $DLM.K = TABLE (DLMT, LFO.K, 0, 1, 0.1)$
 T $DLMT = 0.4/0.7/1/1.25/1.45/1.5/1.5/1.4/1/0.5/0$
 NOTE DLM - MULTIPLICADOR DE SUELO DE VIVIENDAS (ADIMENSIONAL)
 NOTE
 NOTE ***** SECTOR SUBURBANO *****
 NOTE
 L $SP.K = SP.J + (DT) (CSM.JK)$
 N $SP = SPN$
 NOTE SP - POBLACION SUBURBANA (PERSONAS)
 C $SPN = 14000$
 NOTE SPN - POBLACION INICIAL SUBURBANA (PERSONAS)
 R $CSM.KL = OM.JK * FOMS.K$
 NOTE CSM - MIGRACION CIUDAD A LAS AFUERAS (PERSONAS/AÑO)
 A $FOMS.K = TABHL (FOMST, (SCC.K - SP.K)/SCC.K, 0, 1, .2)$
 T $FOMST = 0/0.8/0.9/0.9/0.8/0$
 NOTE FOMS - FRACCION DE MIGRACION A LAS AFUERAS (ADIMENSIONAL)
 A $SCC.K = CCEC.K$
 NOTE SCC - CAPACIDAD DE LOS TRANSPORTES DE CERCANIAS (PERSONAS)
 A $CCEC.K = (CE.K * DDL * LC * DPP * VOC) / (MCD * LPF)$
 NOTE CCEC - CAPACIDAD DE LAS AUTOPISTAS DE CERCANIAS (PERSONAS)
 C $LC = 2000$
 NOTE LC - CAPACIDAD DE CARRIL (VEHICULOS/HORA-CARRIL)
 C $VOC = 1.35$
 NOTE VOC - OCUPACION DE VEHICULO (PERSONAS/VEHICULO)
 C $MCD = 30$

Figura 3.5.2 - ECUACIONES DYNAMO PARA MODELO METROPOLITANO (Continuación) -

```

NOTE MCD - DISTANCIA MAXIMA DE DESPLAZAMIENTO (MILLAS)
C DDL = 0.5
NOTE DDL - DISTRIBUCION DIRECCIONAL DE CARRILES (ADIMENSIONAL)
C DPP = 3
NOTE DPP - DURACION DE LAS HORAS PUNTA (HORAS)
NOTE
NOTE ***** SECTOR TRANSPORTE *****
NOTE
L CE.K = CE.J + (DT) (CEC.JK)
N CE = CEN
NOTE CE - AUTOPISTAS DE ACCESO (CARRILES-MILLA)
C CEN = 100
NOTE CEN - AUTOPISTAS INICIALES DE ACCESO (CARRILES-MILLA)
R CEC.KL = (HF.K / UCC) * FFA
NOTE CEC - CONSTRUCCION DE AUTOPISTAS DE ACCESO (CARRILES-MILLA/AÑO)
C UCC = 2000000
NOTE UCC - COSTE UNITARIO DE CONSTRUCCION ($/CARRIL-MILLA)
C FFA = 1.0
NOTE FFA - FRACCION DE LOS FONDOS ASIGNADOS (FRACCION/AÑO)
L HF.K = HF.J + (DT) (CER.JK - CEM.JK - CEC.JK * UCC/FFA)
N HF = 0
NOTE HF - FONDO DE AUTOPISTAS ($)
R CEM.KL = CE.K * UMC
NOTE CEM - MANTENIMIENTO DE AUTOPISTAS DE ACCESO ($/AÑO)
C UMC = 200000
NOTE UMC - COSTE UNITARIO DE MANTENIMIENTO ($/AÑO-CARRIL-MILLA)
R CER.KL = CE.K * URE.K
NOTE CER - INGRESOS DE AUTOPISTAS DE ACCESO (&/AÑO)
A URE.K = UREN * UREM.K
NOTE URE - INGRESOS UNITARIOS DE LAS AUTOPISTAS DE ACCESO ($/AÑO-CARRIL-MILLA)
C UREN = 400000
NOTE UREN - INGRESOS UNITARIOS NORMALES DE AUTOPISTAS DE ACCESO ($/AÑO-CARRIL-MILLA)
A UREM.K = TABLE (UREMT, CE.K, 0, 1000, 100)
T UREMT = 0/1/1.2/1.3/1.2/1/0.8/0.6/0.5/0.4/0.3
NOTE UREM - MULTIPLICADOR DE LOS INGRESOS UNITARIOS DE LAS AUTOPISTAS DE ACCESO
NOTE (ADIMENSIONAL)
NOTE
NOTE ***** INSTRUCCIONES DE CONTROL *****
NOTE
SPEC DT = 0.5/LENGTH = 100/PLTPER = 2/PRTPER = 2
PRINT CP, SP, LF, J, UR, I, DW
PLOT CP = C, SP = S (0, 2000000)/UR = U (-0.05, 0.25)
PLOT CE = E (0, 1000)
100 SYMBOL TABLE ENTRIES
RUN BASE

```

Figura 3.5.2 - ECUACIONES DYNAMO PARA MODELO METROPOLITANO (Continuación) -

lograda por medio de autopistas, es la causa de la migración de la población desde el centro de la ciudad hacia las áreas suburbanas. Es interesante conocer el grado en que la población suburbana **SP** depende de las millas de carriles de autopistas de cercanías **CE**.

Examinando los datos obtenidos con el ordenador, podemos comparar las distintas estrategias para reducir el desempleo y podemos también observar los efectos sobre la distribución de la población entre la ciudad y las zonas suburbanas. Esto se resume en la Tabla 3.5.1 para un período de 30 años. Las cuatro políticas probadas e indicadas en la Tabla 3.5.1 se pueden describir de la forma siguiente:

- 1 - La Política de Desarrollo Industrial tiene como objetivo la reducción de la escasez de empleos, ya que el empleo aumenta cuando se atraen nuevas industrias, y se tiene en cuenta en el modelo aumentando la variable **ICN**.
 - 2 - La Política de Desarrollo de Vivienda, como los programas de viviendas de protección oficial llevados a cabo durante los «Años de la Gran Sociedad» (eslogan político del Presidente Johnson en los años sesenta), representa una estrategia para alentar la construcción de más viviendas y se tiene en cuenta en el modelo aumentando la variable **DCN**.
 - 3 - La Política de Desarrollo Mixto representa una combinación de un **ICN** creciente, como en el Escenario de Desarrollo Industrial, con la disminución de la **ULD** (Vida Media de las Viviendas), para eliminar las viviendas de los barrios bajos.
 - 4 - La Política del Fondo General se refiere al uso del Fondo de Autopistas para usos distintos de las autopistas, una propuesta que emerge de vez en cuando. De hecho, se ha hecho frecuente la asignación de los beneficios generados por las autopistas a subsidios para el transporte público. Esta política se tiene en cuenta en el modelo a través del parámetro **FFA**.
-

Basándonos en el Índice de Desempleo como una medida de efectividad, podemos observar que las alternativas de desarrollo pueden ser clasificadas de mejor a peor en este caso hipotético de la siguiente forma: Política 3, Política 1, Política de Base, Política 4 y Política 2 (véase la Tabla 3.5.1).

Parámetros	Política de base	Política 1	Política 2	Política 3	Política 4
ICN	0.10	0.15	0.10	0.15	0.10
DCN	0.07	0.10	0.10	0.07	0.07
ULD	66.7	66.7	66.7	33.3	66.7
FFA	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5
CP	140000	1719000	1190000	1766000	1424000
SP	212000	212000	212000	212000	147000
UR	0.14	0.09	0.20	0.02	0.15

Tabla 3.5.1 Comparación de los escenarios en el tiempo, T = 30 años

3.6 Modelo de infraestructuras de recursos de agua

Los esfuerzos de desarrollo regional no pueden limitarse a una inversión única en infraestructura, tal y como sucede en lo relativo al transporte. Siguiendo el diagrama causal en la Figura 3.3.1, vemos que el modelo para este modelo regional contiene los sectores de infraestructura de transporte, agua y energía. Las ecuaciones DYNAMO para los sectores de población, económico y de empleo se dan en la Figura 3.6.1. Supongamos que en esta región hipotética de 240.000 habitantes, las necesidades de agua potable son satisfechas por manantiales subterráneos, pero que éstos se están agotando. La ciudad ha estado durante algún tiempo en medio de una depresión económica, como indica un índice de desempleo del 17%.

El gobierno local desea construir un sistema de suministro de agua que no sólo sirva para satisfacer las necesidades domésticas,

NOTE ESTIMACION DE POBLACION, NECESIDADES DE AGUA
 NOTE E IMPACTO SOCIOECONOMICO
 NOTE *****
 NOTE ***** SECTOR DE POBLACION *****
 L $P.K = P.J + (DT) (NPG.JK + IM.JK - OM.JK)$
 N $P = PN$
 NOTE P - POBLACIÓN (PERSONAS)
 C $PN = 240000$
 NOTE PN - POBLACION EN EL TIEMPO 0 (PERSONAS)
 R $NPG.KL = P.K * NGF$
 NOTE NPG - CRECIMIENTO NETO DE POBLACION (PERSONAS/AÑO)
 C $NGF = 0.02$
 NOTE NGF - FACTOR NETO DE CRECIMIENTO (1/AÑO)
 R $OM.KL = P.K * OMN$
 NOTE OM - MIGRACION HACIA LAS AFUERAS (PERSONAS/AÑO)
 C $OMN = 0.08$
 NOTE OMN - MIGRACION NORMAL HACIA LAS AFUERAS (1/AÑO)
 R $IM.KL = P.K * IMN * RLAM.K$
 NOTE IM - MIGRACION HACIA LA CIUDAD (PERSONAS/AÑO)
 C $IMN = 0.10$
 NOTE IMN - MIGRACION NORMAL HACIA LA CIUDAD (1/AÑO)
 A $RLAM.K = 1 - RLFO.K$
 NOTE RLAM - MULTIPLICADOR DE DISPONIBILIDAD DE TIERRA RESIDENCIAL (ADIMENSIONAL)
 A $RLFO.K = P.K * LPD / (PPD * LZR.K)$
 NOTE RLFO - FRACCION DE LA TIERRA RESIDENCIAL OCUPADA (ADIMENSIONAL)
 C $LPD = 0.5$
 NOTE LPD - TIERRA POR VIVIENDA (ACRES/UNIDAD)
 C $PPD = 3$
 NOTE PPD - PERSONAS POR VIVIENDA (PERSONAS/UNIDAD)
 A $LZR.K = LZRN + B * RCAP$
 NOTE LZR - TIERRA CLASIFICADA RESIDENCIAL (ACRES)
 C $LZRN = 100000$
 NOTE LZRN - TIERRA CLASIFICADA RESIDENCIAL SIN EMBALSES (ACRES)
 C $B = 0.025E-3$
 NOTE B - EFECTO DE LA CAPACIDAD DE EMBALSES SOBRE LA SUPERFICIE RESIDENCIAL (1/PIE)
 NOTE RCAP - CAPACIDAD DE EMBALSE (PIES)
 NOTE
 NOTE ***** SECTOR ECONOMICO *****
 NOTE
 L $BIC.K = BIC.J + (DT) (BICI.JK - BICD.JK)$
 N $BIC = BICN$
 NOTE BIC = CAPITAL DE INDUSTRIAS BASICAS (\$)
 C $BICN = 1.0E10$
 NOTE BICN - CAPITAL DE INDUSTRIAS BASICAS EN EL INSTANTE INICIAL (\$)
 R $BICI.KL = BIP.K * FIPI$
 NOTE BICI - INVERSION DE CAPITAL EN INDUSTRIAS BASICAS (\$/AÑO)
 C $FIPI = 0.2$
 NOTE FIPI - FRACCION INVERTIDA EN PRODUCCION INDUSTRIAL (ADIMENSIONAL)
 A $BIP.K = BIO.K * (1 - FIOI.K)$
 NOTE BIP - PRODUCCION INDUSTRIAL BASICA (\$/AÑO)
 A $FIOI.K = FIOIN * EXP (-RCAP/C)$
 C $FIOIN = 0.7$
 NOTE FIOIN - FRACCION NORMAL DE PRODUCCION INDUSTRIAL

Figura 3.6.1 - ESTIMACIÓN DE POBLACIÓN, NECESIDADES DE AGUA E IMPACTO SOCIOECONÓMICO -

```

NOTE      A PRODUCTOS BASICOS (ADIMENSIONAL)
C C = 10E9
NOTE C - PARAMETRO DE CAPACIDAD (ACRES-PIE)
A BIO.K = BIC.K/COR.K
NOTE BIO - PRODUCCION DE INDUSTRIAS BASICAS ($/AÑO)
A COR.K = CORN * BIC.K/BICN
NOTE COR - RATIO DE CAPITAL A PRODUCCION (AÑOS)
C CORN = 1.8
NOTE CORN - RATIO NORMAL DE CAPITAL A PRODUCCION (AÑOS)
R BICD.KL = BIC.K/ALC
NOTE BICD - DEPRECIACION BASICA DE CAPITAL INDUSTRIAL ($/AÑO)
C ALC = 30
NOTE ALC - VIDA MEDIA DEL CAPITAL (AÑOS)
NOTE
NOTE ***** SECTOR DE EMPLEO *****
NOTE
A BIJ.K = BIC.K/CLR.K
NOTE BIJ - EMPLEOS EN INDUSTRIAS BASICAS (PERSONA)
A CLR.K = CLRN * SQRT (BICN / BIC.K)
NOTE CLR - RATIO DE CAPITAL A MANO DE OBRA ($/PERSONA)
C CLRN = 250000
NOTE CLRN - RATIO NORMAL DE CAPITAL A MANO DE OBRA ($/PERSONA)
A BIW.K = BIP.K * FIPW
NOTE BIW - SALARIOS EN INDUSTRIAS BASICAS
C FIPW = 0.6
NOTE FIPW - FRACCION DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL A SALARIOS (ADIMENSIONAL)
A AWBI.K = BIW.K / BIJ.K
NOTE AWBI - SALARIO MEDIO EN LAS INDUSTRIAS BASICAS ($/PERSONA)
A JBSI.K = BIJ.K * JM
NOTE JBSI - EMPLEOS EN NEGOCIOS DE APOYO A LA INDUSTRIA (PERSONAS)
C JM = 0.7
NOTE JM - MULTIPLICADOR DE EMPLEOS (ADIMENSIONAL)
A JHSI.K = P.K * JCPP
NOTE JHSI - EMPLEOS EN NEGOCIOS DE APOYO AL CONSUMO FAMILIAR (PERSONAS)
C JCPP = 0.05
NOTE JCPP - EMPLEOS CREADOS POR PERSONA (ADIMENSIONAL)
A JOBS.K = BIJ.K + JBSI.K + JHSI.K
NOTE JOBS - NUMERO TOTAL DE EMPLEOS (PERSONAS)
A UR.K = (LF.K - JOBS.K) / LF.K
NOTE UR - INDICE DE DESEMPLEO (ADIMENSIONAL)
A LF.K = P.K * LPF
NOTE LF - MANO DE OBRA (PERSONAS)
C LPF = 0.4
NOTE LPF - FRACCION DE PARTICIPACION LABORAL (PERSONAS/PERSONA)
C RCAP = 4.4E9
SPEC DT = 1 / LENGTH = 100 / PRTPER = 1 / PLTPER = 2
PRINT P, NPG, OM, IM, RLAM, RLFO, LZR
PRINT BIC, BICI, BIP, FIOI, BIO, COR, BICD
PRINT BIJ, CLR, BIW, AWBI, JBSI, JHSI, JOBS, UR, LF
PLOT P = P (0, 800000) / UR (0, 0.25)
RUN
54 SYMBOL TABLE ENTRIES
FILE : WATER 8/12/88 15:22

```

Figura 3.6.1 - ESTIMACIÓN DE POBLACIÓN, NECESIDADES DE AGUA E IMPACTO SOCIOECONÓMICO (Continuación) -

sino también para atraer a industrias con un alto consumo de agua, como puede ser una fábrica de cerveza. La cuenca de agua bajo consideración está a cien millas del centro urbano, tiene una precipitación anual de 40 pulgadas y un coeficiente de vaciado de 0,6. El vaciado de la cuenca tiene lugar de marzo a junio: 1/3 en marzo, 1/3 en abril, 1/6 en mayo y 1/6 en junio. La demanda total (doméstica e industrial) puede estimarse en un promedio de 20 pies cúbicos por persona y día, y varía desde 1/24 del consumo anual de noviembre a febrero hasta 1/6 en julio y agosto. Los planificadores de la ciudad desean que el sistema disponga de una cierta protección contra la sequía, de forma que la oferta satisfaga la demanda con un factor de fiabilidad **R**. Para reducir el tamaño y el costo del acueducto que transportará el agua desde el pantano hasta la ciudad, se construirá un depósito de distribución dentro de la ciudad.

Se toma el año actual como el año base, y se selecciona un momento de tiempo **T** años en el futuro. Para este año objetivo, se desea hallar la capacidad del embalse, **RCAP**, la superficie de la cuenca, **A**, la sección transversal del acueducto, **AA**, el tamaño del depósito de distribución dentro de la ciudad, **DRC**, la producción de energía eléctrica, **EPO**, y, lo que es más importante para nuestros objetivos, el cambio resultante en la tasa de desempleo. Todas las variables de diseño, **AA**, **DRC**, y **EPO** dependen de **RCAP**. Más aún, como se indica en el diagrama causal, la medida de eficacia, **UR**, puede expresarse en función de la variable de decisión, **RCAP**.

$$UR_t = \frac{LF_t - JOBS_t}{LF_t} \quad (3.6.1)$$

en donde

$$JOBS_t = BIJ_t + JBSI_t + JHSI_t \quad (3.6.2)$$

$$JOBS_t = (BIJ_t)(1 + JM) + (P_t)(JCPP) \quad (3.6.3)$$

$$JOBS_t = \frac{BIC_t^{3/2}}{CLRNX \cdot BICN^{1/2}} + (P_t)(JCPP) \quad (3.6.4)$$

y

$$LF_i = (P_i)(LPF) \quad (3.6.5)$$

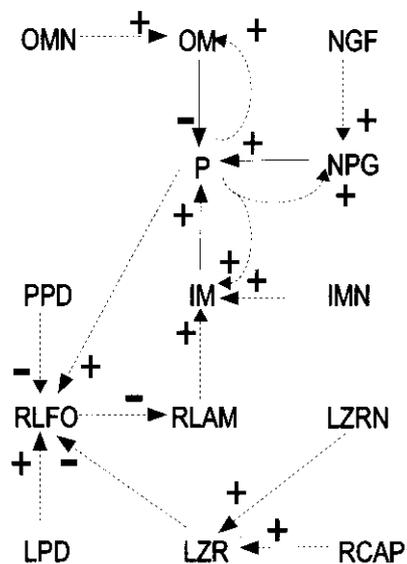
Las expresiones para P_i y BIC_i se derivan en las Figuras 3.6.2 y 3.6.3 con lo que se puede expresar UR directamente en función de $RCAP$. La derivación en función de $RCAP$ se completa en la Figura 3.6.4.

3.7 Desarrollo inducido por el transporte

Uno de los objetivos de esta monografía es demostrar que es posible y muy útil elaborar modelos de desarrollo a partir de planes descritos enteramente en palabras, y culminar en la obtención de políticas óptimas como resultado de los modelos matemáticos. La representación gráfica donde se enlaza el plan verbal con el modelo matemático es el diagrama causal.

La razón por la que no se desarrollan modelos de transporte/desarrollo es que nuestro conocimiento de esta interacción es insuficiente para construir modelos útiles. ¿Pero qué justificación hay para la hipótesis aparente de que no sabemos lo suficiente para construir modelos, pero que sí creemos saber lo suficiente para realizar inversiones enormes en transportes y formular políticas de largo alcance? Sugerimos que conocemos lo suficiente para formular modelos útiles del proceso. Recíprocamente, no sabemos lo suficiente para diseñar el sistema de desarrollo más efectivo inducido por el transporte, sin llevar a cabo primero una fase experimental de construcción de modelos.

Las ecuaciones DYNAMO para el modelo mostrado en el diagrama causal de la Figura 3.7.1 se dan en la Figura 3.7.2. Al examinar los resultados de ordenador para los distintos cambios de parámetros correspondientes a intervenciones políticas, se puede llevar a cabo un cierto análisis de dicha política. Para el sencillo modelo mostrado, existe una solución analítica, y ésta es instructiva. En su forma más pura, el análisis de las distintas políticas consistiría simplemente en una ecuación



(a) - DIAGRAMA CAUSAL -

$$\begin{aligned}
 P.K &= P.J + (DT) (NPG.JK + IM.JK - OM.JK) \\
 NPG.KL &= P.K * NPF \\
 OM.KL &= P.K * OMN \\
 IM.KL &= P.K * IMN * RLAM.K \\
 RLAM.K &= 1 - RLFO.K \\
 RLFO.K &= P.K * LPD / (PPD * LZR.K) \\
 LZR.K &= LZR.N + B * RCAP
 \end{aligned}$$

(b) - ECUACIONES DYNAMO -

$$\begin{aligned}
 NPG_e - OM_e + IM_e &= 0 \\
 P_e (NGF - OMN + IMN * RLAM_e) &= 0 \\
 RLAM_e &= \frac{OMN - NGF}{IMN} \\
 \frac{P_e * LPD}{PPD * LZR_e} &= 1 - \frac{OMN - NGF}{IMN} \\
 P_e &= \frac{PPD}{LPD} \left(1 - \frac{OMN - NGF}{IMN} \right) (LZR_e)
 \end{aligned}$$

(c) - ANÁLISIS DE ESTADO ESTACIONARIO -

Figura 3.6.2. - ANÁLISIS DEL SECTOR DE POBLACIÓN -

$$\frac{dP_t}{dt} = NPG_t - OM_t + IM_t$$

$$\frac{dP_t}{dt} = P_t (NGF - OMN + IMN * RLAM_t) = P_t \left[\frac{NGF - OMN}{IMN} + (1 - RLFO_t) \right] IMN$$

$$\frac{dP_t}{dt} = P_t \left[\left(1 - \frac{OMN - NGF}{IMN}\right) - \frac{P_t * LPD}{PPD * LZR_t} \right] IMN$$

$$\frac{dP_t}{dt} = P_t \left[\left(1 - \frac{OMN - NGF}{IMN}\right) \frac{PPD}{LPD} LZR_t - P_t \right] * IMN * \left(\frac{LPD}{PPD} * \frac{1}{LZRN + B * RCAP} \right)$$

$$\frac{dP_t}{dt} = P_t (P_e - P_t) * \frac{LPD}{PPD} * \frac{1}{LZRN + B * RCAP} * IMN$$

$$\int_{P_0}^{P_t} \frac{dP_t}{P_t (P_e - P_t)} = IMN * \frac{LPD}{PPD} \frac{t}{LZRN + B * RCAP}$$

$$\frac{1}{P_e} \int_{PN}^{P_t} \left(\frac{dP_t}{P_t} + \frac{dP_t}{P_e - P_t} \right) = IMN * \frac{LPD}{PPD} \frac{t}{LZRN + B * RCAP}$$

$$\ln \frac{P_t}{P_e - P_t} \Big|_{PN}^{P_t} = IMN * \left(1 - \frac{OMN - NGF}{IMN}\right) t$$

$$\frac{P_t}{P_e - P_t} = \frac{PN}{P_e - PN} e^{(IMN - OMN + NGF)t}$$

$$P_t = \frac{P_e}{1 + \left(\frac{P_e}{PN} - 1\right) e^{-(IMN - OMN + NGF)t}}$$

(d) - ANÁLISIS DE TRANSITORIOS -

Figura 3.6.2. - ANÁLISIS DEL SECTOR DE POBLACIÓN (Continuación) -

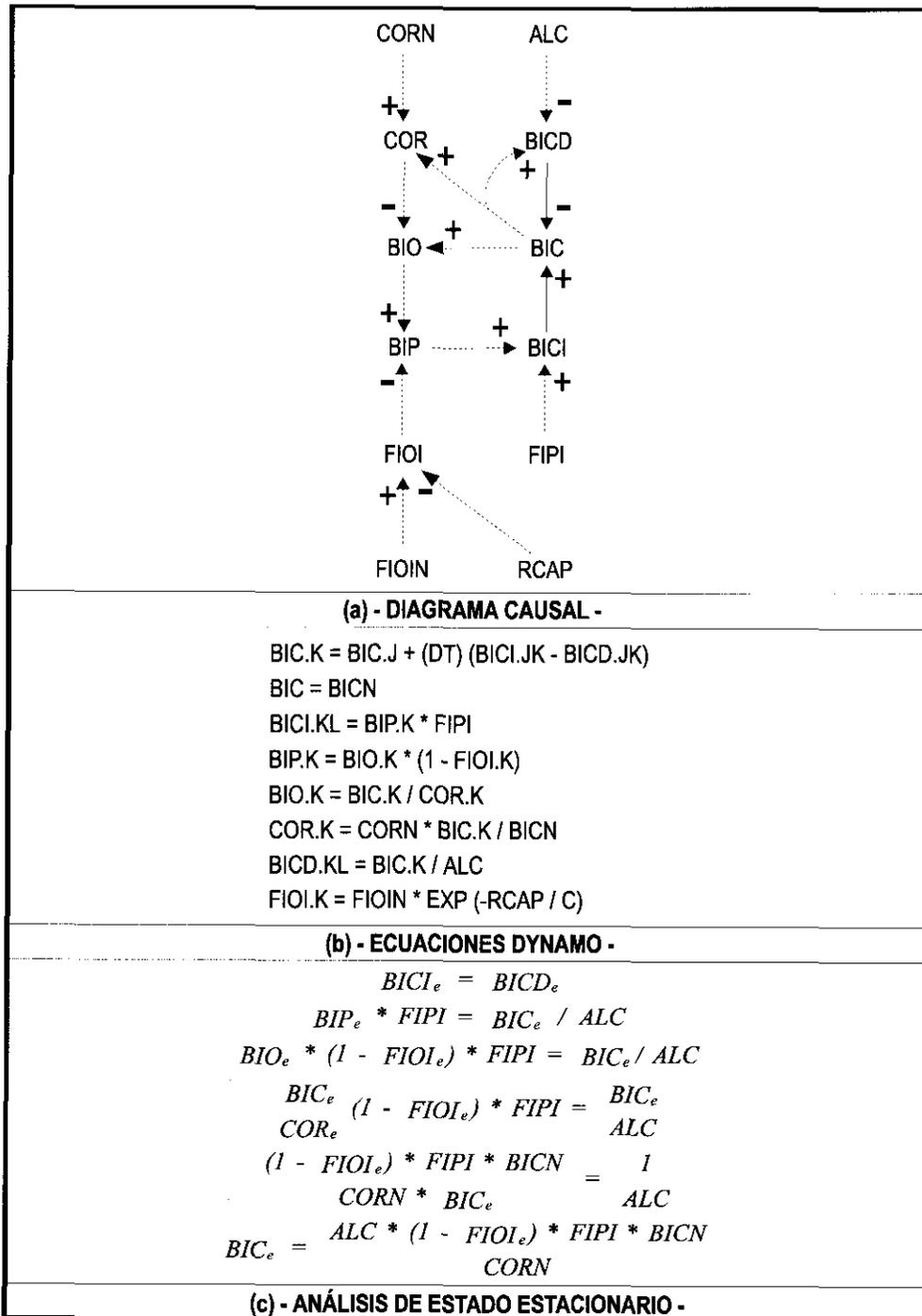


Figura 3.6.3. - ANÁLISIS DEL SECTOR ECONÓMICO -

$$\frac{dBIC_t}{dt} = BIC_{t-1} - BIC_t$$

$$\frac{dBIC_t}{dt} = BIP_t * FIPI - \frac{BIC_t}{ALC} = BIO_t * (1 - FIOI_t) * FIPI - \frac{BIC_t}{ALC}$$

$$\frac{dBIC_t}{dt} = \frac{BIC_t}{COR_t} (1 - FIOI_t) * FIPI - \frac{BIC_t}{ALC} = \frac{BIC_t * BICN * (1 - FIOI_t) * FIPI}{CORN - BIC_t} - \frac{BIC_t}{ALC}$$

$$\frac{dBIC_t}{dt} = \left(\frac{ALC * BICN * (1 - FIOI_t) * FIPI}{CORN} - BIC_t \right) \frac{1}{ALC}$$

$$\frac{dBIC_t}{dt} = (BIC_e - BIC_t) / ALC$$

$$\int_{BIC_t}^{BIC_e} \frac{dBIC_t}{BIC_e - BIC_t} = \int_0^t \frac{dt}{ALC}$$

$$-\ln(BIC_e - BIC_t) \Big|_{BIC_t} = \frac{t}{ALC}$$

$$\ln \frac{BIC_e - BIC_t}{BIC_e - BICN} = -\frac{t}{ALC}$$

$$\frac{BIC_e - BIC_t}{BIC_e - BICN} = e^{-t/ALC}$$

$$BIC_t = BIC_e - (BIC_e - BICN) e^{-t/ALC}$$

(d) - ANÁLISIS DE TRANSITORIOS -

Figura 3.6.3. - ANÁLISIS DEL SECTOR ECONÓMICO (Continuación) -

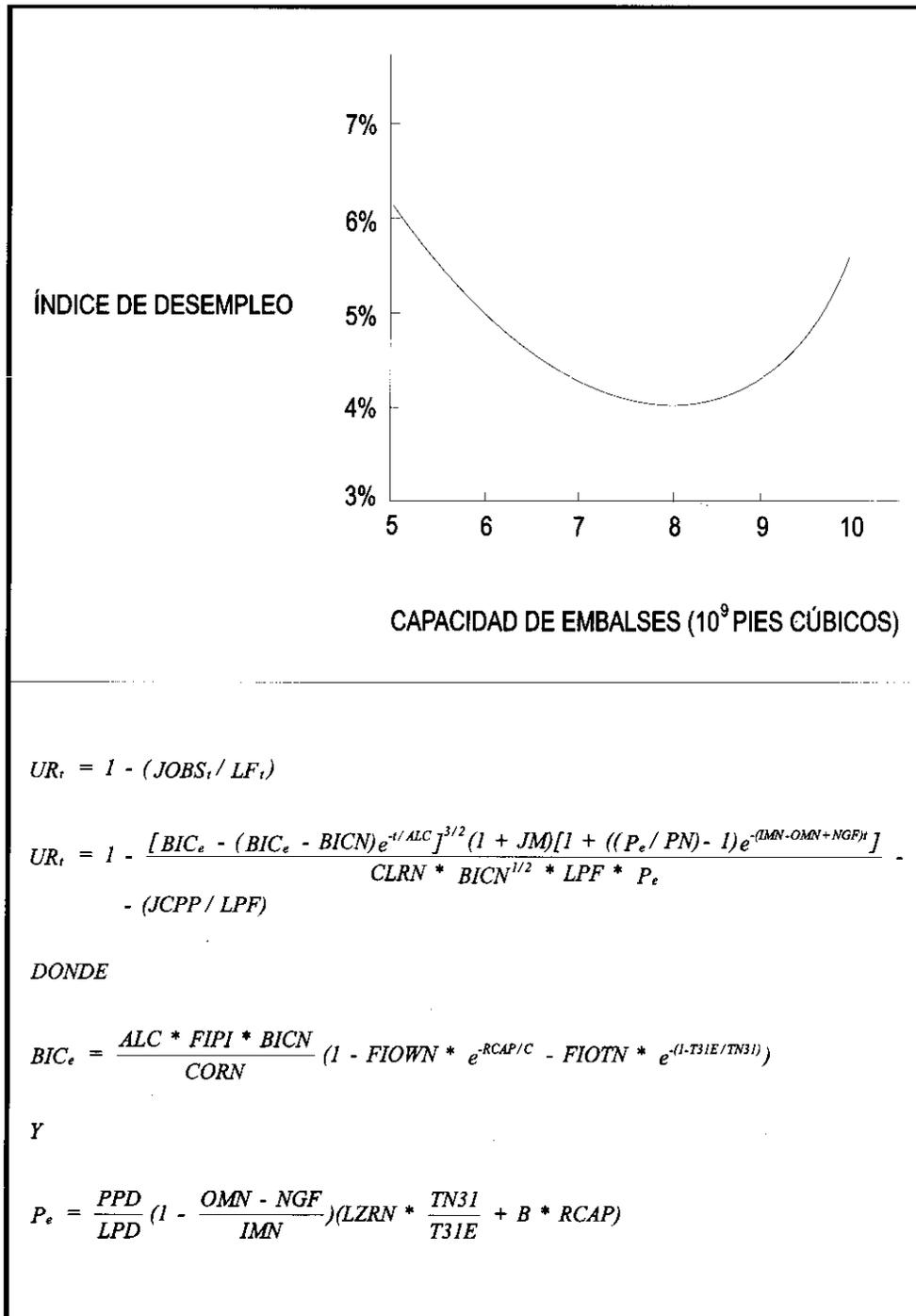


Figura 3.6.4. - ÍNDICE DE DESEMPLEO EN FUNCIÓN DE LA CAPACIDAD DE EMBALSES -

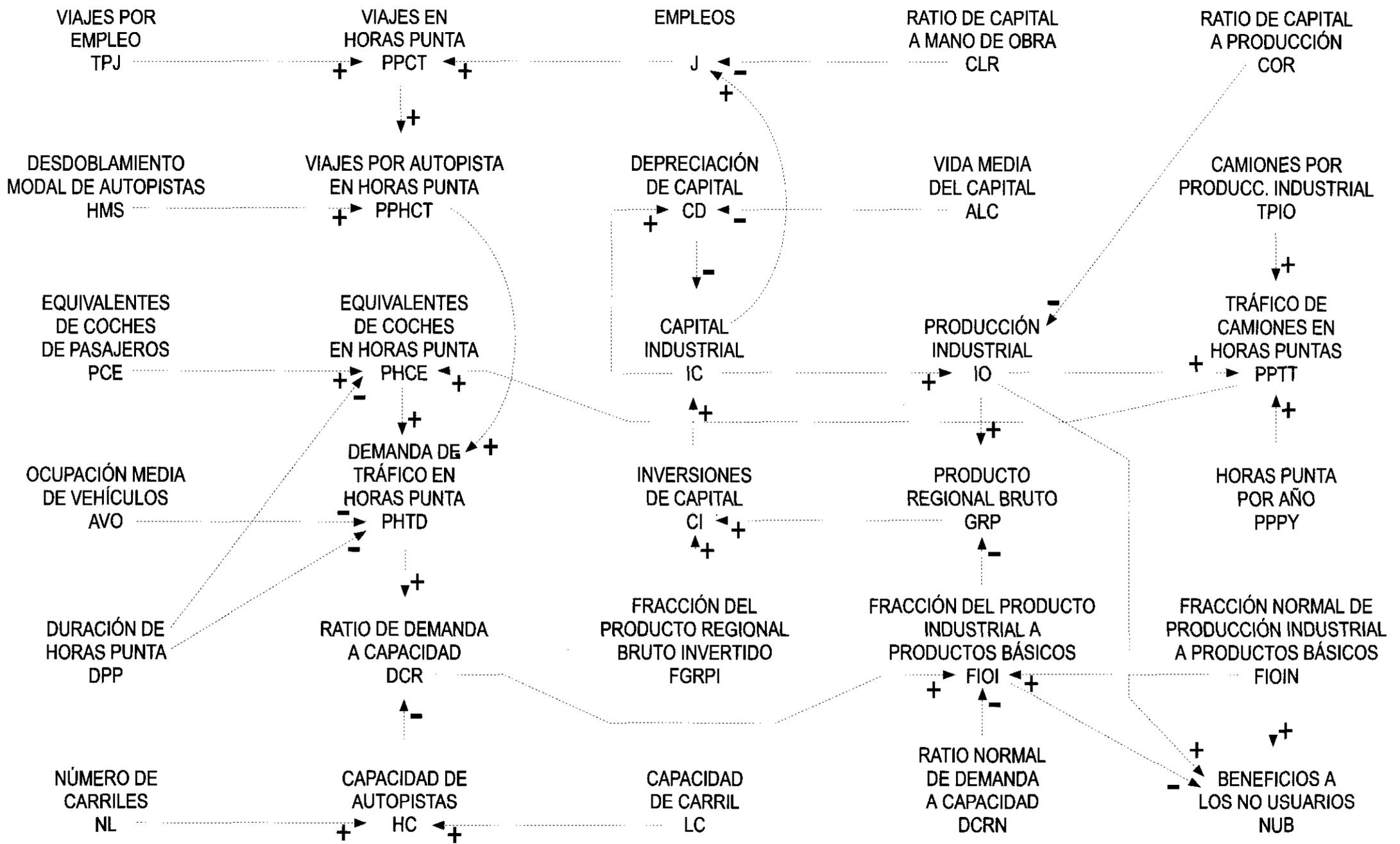


Figura 3.7.1 - RELACIÓN ENTRE EL TRANSPORTE POR AUTOPISTAS Y EL DESARROLLO ECONÓMICO -

en la que la variable dependiente fuera la medida de eficacia expresada en función de constantes correspondientes a los parámetros de la política (véase la Figura 3.7.3). Se puede preparar con facilidad un resumen de las políticas, como el mostrado en la Figura 3.7.4, en donde se ve cuáles son las variables políticas que influyen en el beneficio del usuario (el Ratio Demanda - Capacidad, **DCR**) y en resultados que no afectan directamente al usuario (el Producto Regional Bruto, **GRP**). Las Figuras 3.7.5 y 3.7.6 son interpretaciones gráficas de los beneficios de los Usuarios y No Usuarios resultantes de las iniciativas en el transporte. Para que los beneficios de los no usuarios sean distribuidos entre las distintas iniciativas de infraestructura, se requiere el análisis de **FIOI** mostrado en la Figura 3.7.7 [19].

Las ciudades juegan un papel preponderante como puntos nodales en el proceso de desarrollo. Son las detentadoras del poder, las semillas del cambio, las sedes del conocimiento, las máquinas de producción y los lugares donde confluye el control. Las ciudades son el resultado de la división y especialización del trabajo, hecho posible por los medios de transporte. Si el transporte es uno de los precursores de la urbanización de las ciudades y de la periferia, puede usarse para guiar su crecimiento y distribución, influyendo, de este modo, en el desarrollo económico selectivo.

Demasiado a menudo, se conceptualiza el impacto del transporte en el desarrollo económico únicamente en función de la alternativa de inversión, lo cual significa la construcción de nuevas infraestructuras. Se olvidan las mejoras de bajo coste y las alternativas de coste cero. Consideremos, una vez más, el modelo sencillo descrito en el diagrama causal de la Figura 3.7.1. La variable de decisión asociada con la estrategia de inversión es el Número de Carriles, **NL**, que corresponde al aumento de la Capacidad de Autopistas, **HC**, por medio de nueva construcción. No obstante, es igualmente eficaz, para aumentar los beneficios del no usuario debidos al Producto Regional Bruto, **GRP**, incrementar la Ocupación Media por Vehículo, **AVO**, usando carriles de Vehículos de Alta Ocupación, **HOV**, incrementar la Duración de las

$L \quad IC.K = IC.J + (DT)(CI.JK - CD.JK)$
 $N \quad IC = ICN$
 NOTE IC - CAPITAL INDUSTRIAL (\$)
 $C \quad ICN = 889.1E6$
 NOTE ICN - VALOR INICIAL DEL CAPITAL INDUSTRIAL (\$)
 $R \quad CD.KL = IC.K/ALC$
 NOTE CD - DEPRECIACION DEL CAPITAL (\$/AÑO)
 $C \quad ALC = 16.67$
 NOTE ALC - VIDA MEDIA DEL CAPITAL (AÑOS)
 $R \quad CI.KL = GRP.K * FGRPI$
 NOTE CI - INVERSIONES DE CAPITAL (\$/AÑO)
 $C \quad FGRPI = 0.2$
 NOTE FGRPI - FRACCION DEL PRODUCTO REGIONAL BRUTO INVERTIDO (ADIMENSIONAL)
 $A \quad GRP.K = IO.K * (1-FIOI.K)$
 NOTE GRP - PRODUCTO REGIONAL BRUTO (\$/AÑO)
 $A \quad IO.K = IC.K/COR$
 NOTE IO - PRODUCTO INDUSTRIAL (\$)
 $C \quad COR = 2$
 NOTE COR - RATIO DE CAPITAL A PRODUCCION (AÑOS)
 $A \quad FIOI.K = FIOIN * DCR.K/DCRN$
 NOTE FIOI - FRACCION DE PRODUCCION INDUSTRIAL A
 NOTE PRODUCTOS BASICOS (ADIMENSIONAL)
 $C \quad FIOIN = 0.4$
 NOTE FIOIN - FRACCION NORMAL DE PRODUCCION INDUSTRIAL
 NOTE A PRODUCTOS BASICOS (ADIMENSIONAL)
 $C \quad DCRN = 1.0$
 NOTE DCRN - RATIO NORMAL DE DEMANDA A CAPACIDAD (ADIMENSIONAL)
 $A \quad DCR.K = PHTD.K/HC$
 NOTE DCR - RATIO DE DEMANDA A CAPACIDAD (ADIMENSIONAL)
 $N \quad HC = NL * LC$
 NOTE HC - CAPACIDAD DE AUTOPISTAS (VEHICULOS/AÑO)
 $C \quad NL = 4$
 NOTE NL - NUMERO DE CARRILES (CARRILES)

Figura 3.7.2 - ECUACIONES QUE RELACIONAN EL TRANSPORTE POR AUTOPISTAS Y EL DESARROLLO ECONÓMICO -

C LC = 2000
 NOTE LC - CAPACIDAD DE CARRIL (VEH/HORA-CARRIL)
 A PHTD.K = PHCE.K + PPHCT.K/(AVO * DPP)
 NOTE PHTD - DEMANDA DE TRAFICO EN HORAS PUNTA (VEH/HORAS)
 C AVO = 1.0
 NOTE AVO - OCUPACION MEDIA DE VEHICULOS
 NOTE (PERSONAS/VEH)
 C DPP = 2.0
 NOTE DPP - DURACION DE HORAS PUNTA (HORAS/PERIODO)
 A PHCE.K = PPTT.K * PCE/DPP
 NOTE PHCE - EQUIVALENTES DE COCHES EN HORAS PUNTA (VEH/HORA)
 C PCE = 4
 NOTE PCE - EQUIVALENTES DE COCHES DE PASAJEROS (VEH/CAMION)
 A PPTT.K = IO.K * TPIO/PPPY
 NOTE PPTT - TRAFICO DE CAMIONES EN HORAS PUNTA (CAMIONES/PERIODO)
 C TPIO = 0.0003
 NOTE TPIO - CAMIONES POR PRODUCCION INDUSTRIAL (CAMIONES/\$)
 C PPY = 300
 NOTE PPY - HORAS PUNTA POR AÑO (PERIODOS/AÑO)
 A PPHCT.K = PPCT.K * HMS
 NOTE PPHCT - VIAJES POR AUTOPISTA EN HORAS PUNTA (VIAJES/PERIODO)
 C HMS = 0.8
 NOTE HMS - DESDOBLAMIENTO DEL MODELO
 NOTE DE AUTOPISTAS (ADIMENSIONAL)
 A PPCT.K = J.K * TPJ
 NOTE PPCT - VIAJES EN HORAS PUNTA (VIAJES/PERIODO)
 C TPJ = 1.0
 NOTE TPJ - VIAJES POR EMPLEO (VIAJES/PERSONA)
 A J.K = IC.K/CLR
 NOTE J - EMPLEOS (PERSONAS)
 C CLR = 50000
 NOTE CLR - RATIO DE CAPITAL A
 NOTE MANO DE OBRA (\$/PERSONA)

Figura 3.7.2 - ECUACIONES QUE RELACIONAN EL TRANSPORTE POR AUTOPISTAS Y EL DESARROLLO ECONÓMICO - (Continuación)

•SE REALIZA EL ANÁLISIS DE ESTADO ESTACIONARIO IGUALANDO LOS FLUJOS Y SUSTITUYENDO EN CADA LADO HASTA QUE SE ENCUENTRA EL VALOR DE EQUILIBRIO DE LA VARIABLE DE NIVEL, IC_e :

$$CI_t = CD_t \quad (1)$$

$$IC_e = \frac{(DPP * LC * NL) \left(\frac{DCRN}{FIOIN} \right) \left(1 - \frac{COR}{FGRPI * ALC} \right)}{\frac{TPIO * PCE}{COR * PPPY} + \frac{TPJ * HMS}{CLR * AVO}} \quad (2)$$

•EL TRANSITORIO SE ENCUENTRA RESOLVIENDO LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DEL SISTEMA:

$$dIC_t / dt = CI_t - CD_t = (IC_e - IC_t) (IC_t) (K) \quad (3)$$

DONDE

$$K = \left(\frac{FGRPI}{COR} \right) \left(\frac{FIOIN}{NL * LC * DCRN} \right) \left(\frac{TPIO * PCE}{COR * PPPY} + \frac{TPJ * HMS}{CLR * AVO} \right) \left(\frac{1}{DPP} \right) \quad (4)$$

DANDO

$$IC_t = \frac{IC_e}{1 + \left(\frac{IC_e}{IC_0} - 1 \right) e^{\left(\frac{FGRPI}{COR} - \frac{1}{ALC} \right) t}} \quad (5)$$

•LA "SOLUCIÓN" SE OBTIENE EXPRESANDO LAS MEDIDAS DE EFECTIVIDAD, DCR_e Y GRP_e , EN TÉRMINOS DE VARIABLES DEL MODELO:

$$DCR_e = \left(\frac{DCRN}{FIOIN} \right) \left(1 - \frac{COR}{FGRPI * ALC} \right) \quad (6)$$

$$GRP_e = \frac{DCR_e}{\left(\frac{ALC * FGRPI}{DPP * LC * NL} \right) \left(\frac{TPIO * PCE}{COR * PPPY} + \frac{TPJ * HMS}{CLR * AVO} \right)} \quad (7)$$

Figura 3.7.3 - SOLUCIÓN ANALÍTICA -

Horas Punta, **DPP**, dispersando los horarios de trabajo, incrementar la Capacidad de los Carriles, **LC**, por medio del control de acceso, disminuir los Viajes por Empleo, **TPJ**, por medio de las telecomunicaciones, disminuir la División Modal de las Autopistas, **HMS**, mejorando el transporte público, y disminuir los Equivalentes de Coches de Pasajeros con el aumento del rendimiento de los camiones. El impacto de estas iniciativas que no requieren inversión es el mismo, pero se logra con una fracción de los costes. La importancia de la Administración de los Sistemas de Transportes, **TSM**, como sustituto de la expansión de los medios de transporte a través de la construcción, no debe ser infravalorada.

TSM emplea tres estrategias básicas para influir en las relaciones oferta-demanda: (1) uso más eficaz de las autopistas; (2) reducción del uso de los vehículos; y (3) mejora del servicio de transporte público. Dentro de cada estrategia existen varias tácticas.

VARIABLE DEL MODELO	CAMBIOS EN VARIABLE DEL MODELO NECESARIOS PARA DISMINUIR DCR _e	CAMBIOS EN VARIABLE DEL MODELO NECESARIOS PARA AUMENTAR GRP _e
TJP	NO TIENE EFECTO	DISMINUCIÓN
HMS	NO TIENE EFECTO	DISMINUCIÓN
PCE	NO TIENE EFECTO	DISMINUCIÓN
AVO	NO TIENE EFECTO	AUMENTO
DPP	NO TIENE EFECTO	AUMENTO
NL	NO TIENE EFECTO	AUMENTO
LC	NO TIENE EFECTO	AUMENTO
FGRPI	AUMENTO	AUMENTO
ALC	AUMENTO	AUMENTO
CLR	NO TIENE EFECTO	AUMENTO
COR	DISMINUCIÓN	DISMINUCIÓN
TPIO	NO TIENE EFECTO	DISMINUCIÓN
PPPY	NO TIENE EFECTO	AUMENTO
FIOIN	DISMINUCIÓN	DISMINUCIÓN

Figura 3.7.4 - RESUMEN DEL MODELO -

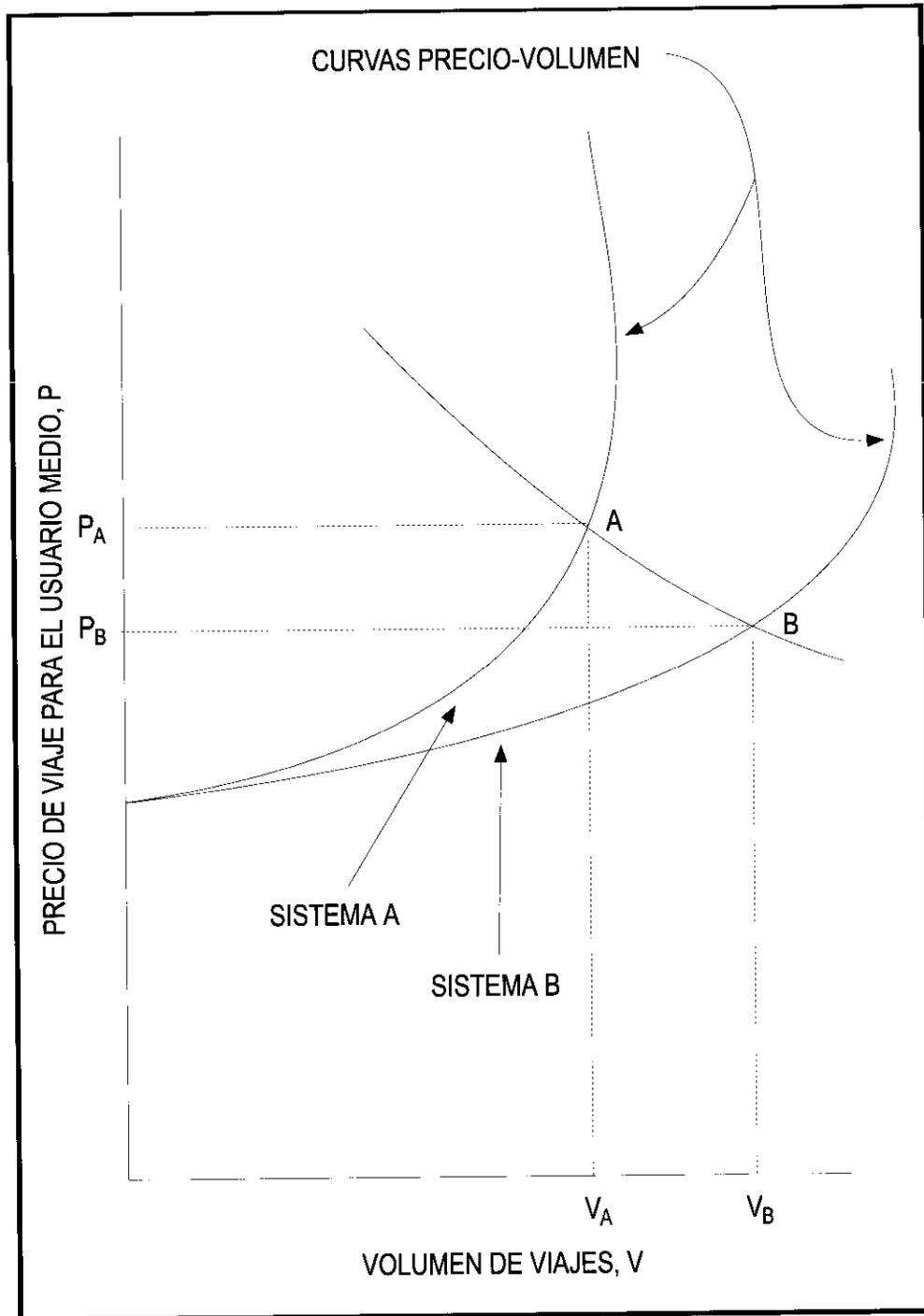


Figura 3.7.5 - RELACIONES DE BENEFICIOS Y COSTE DEL USUARIO -

Los cambios en el flujo del tráfico, que pueden dar lugar a beneficios importantes relativos al nivel de servicio y al aumento de capacidad, se pueden lograr por medio de medidas de ingeniería de tráfico como las siguientes: (1) mejoras en las operaciones de tráfico; (2) mejoras en la señalización del tráfico; (3) designaciones especiales de las autopistas; y (4) vigilancia y control de las autopistas. Las acciones de **TSM** para modificar la demanda de vehículos incluyen: (1) tratamiento prioritario de vehículos de alta ocupación; (2) administración de los horarios de trabajo; (3) coordinación intermodal; (4) uso de desincentivos económicos; y (5) administración del movimiento y operaciones del transporte de mercancías. Las medidas de **TSM** para mejorar el transporte público incluyen: (1) una mayor flexibilidad en la programación de las rutas; (2) servicios expresos de autobuses; (3) servicios de transporte desde áreas de aparcamiento en la periferia; y (4) instalaciones de aparcamiento y transporte, etc.

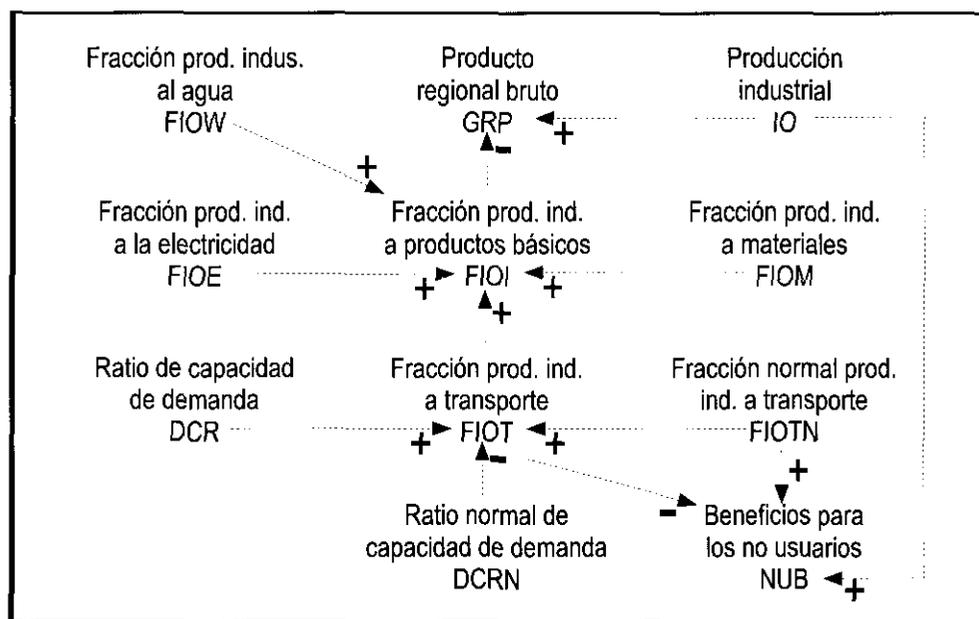


Figura 3.7.6 - DIAGRAMA CAUSAL DEL DESGLOSE DE FIOI -

Hay que excluir medidas a largo plazo, soluciones intensivas de capital como la construcción de más autopistas e inversiones masivas en transportes públicos, y fomentar el cambio a conceptos probados, como la vigilancia y control de autopistas, y otras iniciativas prometedoras como «Vehículos y Sistemas de Autopistas Inteligentes».

3.8 Mantenimiento de infraestructuras

El mantenimiento de las instalaciones se aplaza a menudo debido a la falta de financiación. Algunas instalaciones se usan por encima de la capacidad para la que han sido diseñadas, acelerándose así el deterioro de las mismas. Los estándares de diseño han cambiado para mejorar la seguridad, lo que ha dejado anticuadas, funcionalmente hablando, muchas estructuras. Por ejemplo, muchos puentes son demasiado estrechos para el tráfico actual de alta velocidad y requieren

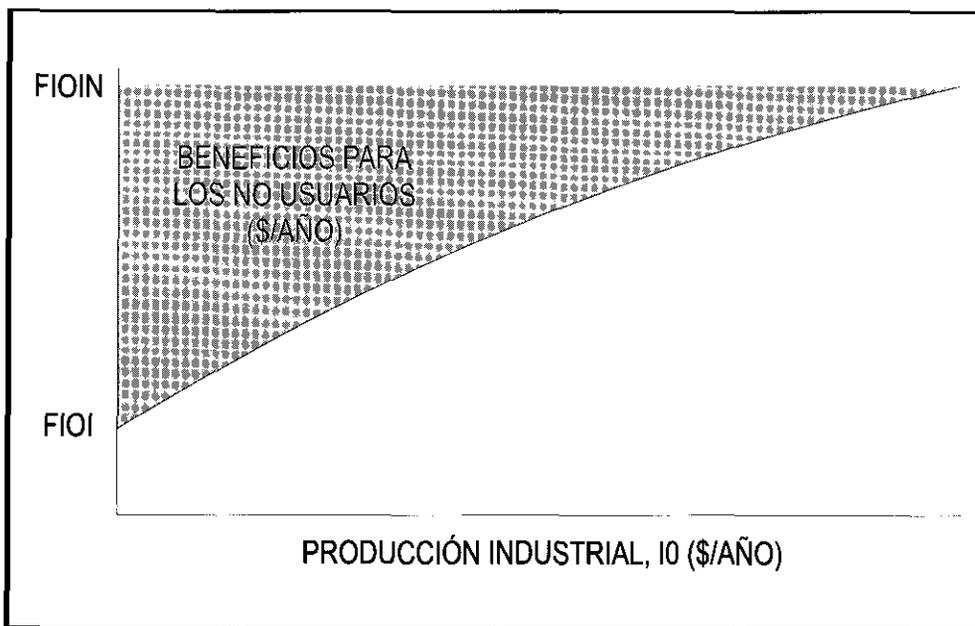


Figura 3.7.7 - GRÁFICO CON LA DETERMINACIÓN DE LOS BENEFICIOS PARA LOS NO USUARIOS -

ser ensanchados. La necesidad de reparar o rehabilitar estructuras antiguas se ignora demasiado a menudo. Muchas instalaciones públicas han superado la vida útil para la que han sido diseñadas y requerirán una extensa rehabilitación para que sigan funcionando.

El sistema político puede a veces obstaculizar todavía más la reparación de las estructuras. Los cargos elegidos tienen a menudo una visión política a corto plazo, y les puede tentar el aplazar el gasto en un proyecto de reparación, que tendría un beneficio futuro mayor, para realizar un gasto en el momento actual, que recibe una mayor publicidad. Unas instalaciones nuevas lucen mucho más que unos contratos para la sustitución de las conducciones de agua. Aumentar el sueldo a los maestros o una contratación adicional de policías puede rendir más a nivel político que las reparaciones de las líneas de alcantarillado. El dinero que podría haber sido empleado en reparaciones o en mantenimiento se aplica a menudo a productos más visibles. Desafortunadamente, las nuevas instalaciones construidas por su visibilidad política requerirán también un mantenimiento futuro, lo mismo que las infraestructuras actuales. Como resultado de esto, se requerirán fondos adicionales en el presupuesto del gobierno para el mantenimiento de las instalaciones nuevas. No se habrán resuelto los problemas actuales de infraestructura y, con mucha probabilidad, el costo de las reparaciones futuras se habrá incrementado debido al aplazamiento de las acciones necesarias.

La duración de los equipamientos o de las infraestructuras depende del deterioro y la obsolescencia. Por ejemplo, consideremos las autopistas: el deterioro se produce por el paso del tiempo. A medida que las condiciones climatológicas, la carga de tráfico y las fuerzas medioambientales actúan sobre el firme, éste empezará a mostrar signos de desgaste o deterioro. Se requiere un mantenimiento para conservar la calzada en buen estado de uso. El aplazamiento de este mantenimiento contribuirá a un deterioro más rápido.

Otro factor que afecta a la duración de la calzada es la obsolescencia. El tráfico aumenta debido al crecimiento de la población, al cambio en la distribución del tráfico, a la nueva industria, etc., y la red de transportes ya no es capaz de absorber el tráfico de las autopistas. Se produce, así, una saturación y congestión, y la autopista se queda anticuada, en tanto que ya no puede desempeñar la misión para la que fue diseñada originalmente.

El deterioro es la disminución de la eficacia comparada con la que existía cuando la instalación era nueva. Análogamente, la eficacia de las autopistas disminuye como se muestra por el decrecimiento del índice **PSI**, Índice de Suficiencia de la Calzada. Del mismo modo que el deterioro de una máquina da lugar a un mayor mantenimiento y a mayores costes laborales, el deterioro de las autopistas tiene también como resultado un mayor mantenimiento y mayores costes. La obsolescencia es la disminución de la eficacia de ingeniería de un sistema cuando éste es nuevo, comparándola con la eficacia de ingeniería óptima existente. Los equipamientos se comparan sobre una base tecnológica pero las infraestructuras deben ser consideradas desde el punto de vista de las necesidades. La eficacia de ingeniería de las estructuras disminuye con el paso del tiempo debido a los aumentos de demanda impuestos sobre el sistema, aunque el sistema fuese mantenido de acuerdo con los parámetros de operación. Por ejemplo, una red de transportes sólo podrá acomodar un número determinado de vehículos antes de que las velocidades y el volumen se reduzcan por debajo del máximo, aunque la calzada esté en un estado excelente. La obsolescencia es la disminución de la eficacia de ingeniería del sistema, desde que estaba nuevo hasta el estado actual en el que los requisitos son mayores.

El diagrama causal para la extensión del Modelo de Mantenimiento de Autopistas, denominado Modelo de Mantenimiento de Autopistas II, se muestra en la Figura 3.8.1, y las ecuaciones DYNAMO en la Figura 3.8.2. Para determinar el valor óptimo del Gasto de Mantenimiento de Autopistas, **HME**, en la Figura 3.8.3 se

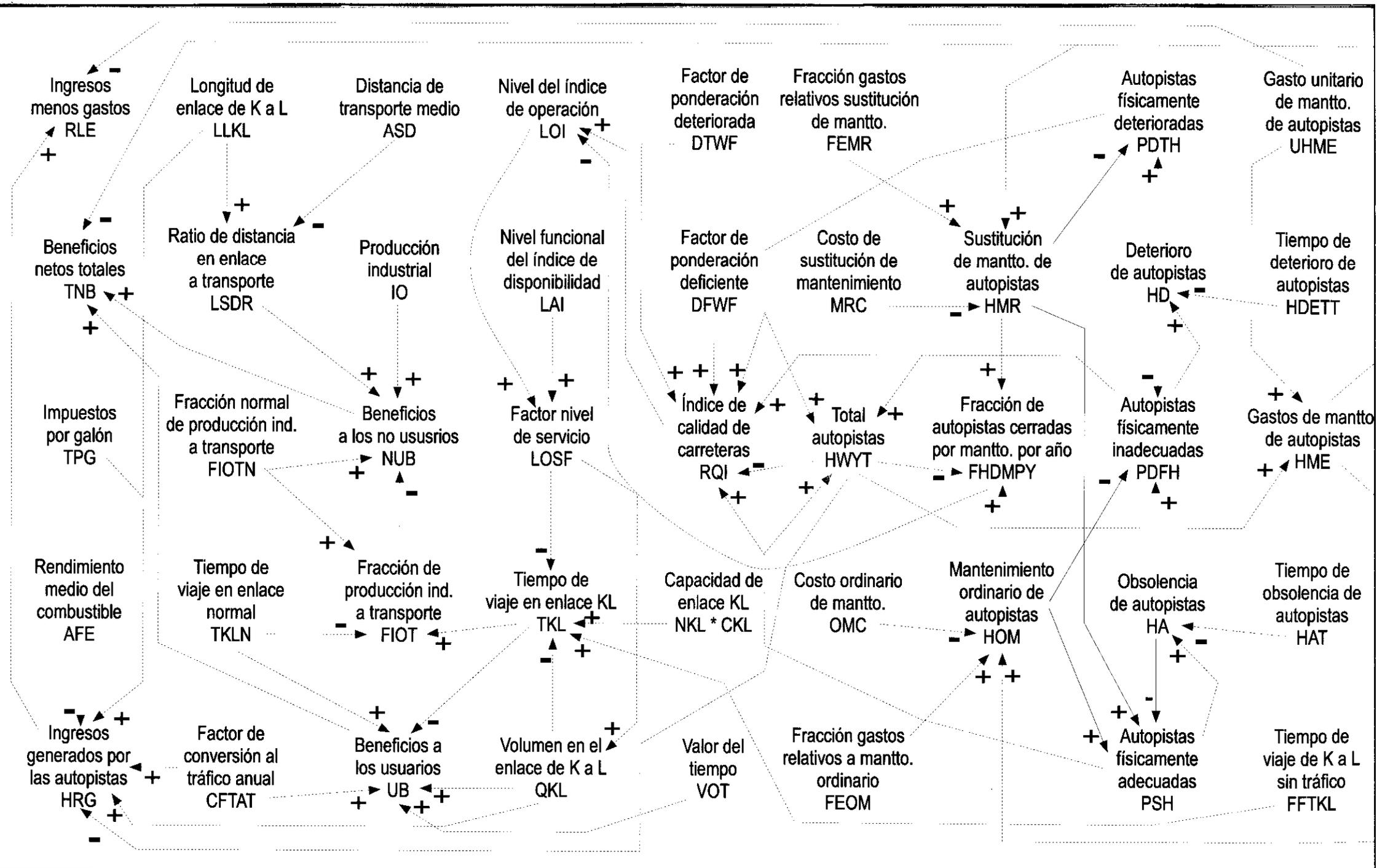


Figura 3.8.1 - DIAGRAMA CAUSAL DEL MODELO DE MANTENIMIENTO DE AUTOPISTAS -

lleva a cabo un análisis del estado estacionario en el que se relaciona una medida de la eficacia, Ingresos Menos Gastos, **RLE**, en función de la variable de decisión, Gasto de Mantenimiento de Autopistas, **HME**.

En conclusión, la mayoría de los proyectos de obras públicas no tienen en cuenta el impacto a largo plazo de una nueva instalación. El énfasis principal se pone en la construcción de la nueva estructura o en la rehabilitación completa de una ya existente. Muchos proyectos se inician debido a la presión por hacer algo, sin considerar el impacto de aplazar otros proyectos.

3.9 Desarrollo sostenible

El medio ambiente engloba todos los aspectos del entorno de la vida que afectan a la especie humana, tanto a individuos como a grupos sociales. La calidad del medio ambiente está cambiando continuamente bajo la acción de procesos medioambientales. El impacto sobre el medio ambiente designa el cambio en la calidad medioambiental debido a la contaminación. El desarrollo es el proceso socio-económico que involucra la aplicación de recursos para satisfacer las necesidades humanas y mejorar la calidad de vida; el desarrollo, por tanto, afecta al medio ambiente. Para que el desarrollo sea significativo, debe tener en cuenta los factores económicos y ecológicos, tanto de la base de recursos vivientes como no vivientes, y las ventajas y desventajas de las acciones alternativas.

Durante la última década, se ha producido un cambio en el debate de los problemas relativos a la administración del medio ambiente. En la actualidad, la atención se centra en los problemas medioambientales en su relación con el problema de prioridades sociales. El objetivo es determinar cuál es el coste que la sociedad puede soportar para la protección del medio ambiente, en concordancia con otras inquietudes sociales tales como el desarrollo económico, la

L $PSH.K = PSH.J + (DT) (HOM.JK + HMR.JK - HA.JK)$
 N $PSH = PSHN$
 NOTE PSH - AUTOPISTAS FISICAMENTE ADECUADAS (CARRILES-MILLA)
 C $PSHN = 200$
 L $PDFH.K = PDFH.J + (DT) (HA.JK - HD.JK - HOM.JK)$
 N $PDFH = PDFHN$
 NOTE PDFH - AUTOPISTAS FISICAMENTE INADECUADAS (CARRILES-MILLA)
 C $PDFHN = 100$
 L $PDTH.K = PDTH.J + (DT) (HD.JK - HMR.JK)$
 N $PDTH = PDTHN$
 NOTE PDTH - AUTOPISTAS FISICAMENTE DETERIORADAS (CARRILES-MILLA)
 C $PDTHN = 100$
 R $HA.KL = PSH.K/HAT$
 NOTE HA - OBSOLESCENCIA DE AUTOPISTAS (CARRILES-MILLA/AÑO)
 C $HAT = 5$
 NOTE HAT - TIEMPO DE OBSOLESCENCIA DE AUTOPISTAS (AÑOS)
 R $HD.KL = PDFH.K/HDETT$
 NOTE HD - DETERIORO DE AUTOPISTAS (CARRILES-MILLA/AÑO)
 C $HDETT = 10$
 NOTE HDETT - TIEMPO DE DETERIORO DE AUTOPISTAS (AÑOS)
 R $HOM.KL = HME * FEOM/OMC$
 NOTE HOM - MANTENIMIENTO ORDINARIO DE AUTOPISTAS (CARRILES-MILLA/AÑO)
 N $HME = UMHE * HWYT$
 NOTE HME - GASTOS DE MANTENIMIENTO DE AUTOPISTAS (\$/AÑO)
 C $FEOM = 0.5$
 NOTE FEOM - FRACCION DE GASTOS RELATIVOS A MANTENIMIENTO ORDINARIO (ADIMENSIONAL)
 C $OMC = 50000$
 NOTE OMC - COSTE ORDINARIO DE MANTENIMIENTO (\$/CARRILES-MILLA)
 R $HMR.KL = HME * FEMR.K/MRC$
 NOTE HMR - SUSTITUCION DE MANTENIMIENTO DE AUTOPISTAS (CARRILES-MILLAS/AÑO)
 A $FEMR.K = 1 - FEOM$
 NOTE FEMR - FRACCION DE GASTOS RELATIVOS A SUSTITUCION DE MANTENIMIENTO (ADIMENSIONAL)
 C $MRC = 200000$
 NOTE MRC - COSTO DE SUSTITUCION DE MANTENIMIENTO (\$/CARRILES-MILLA)
 N $HWYT = PSHN + PDFHN + PDTHN$
 NOTE HWYT - TOTAL AUTOPISTAS (CARRILES-MILLA)
 A $FHDMPY.K = (HOM.KL + HMR.KL)/HWYT$
 NOTE FHDMPY - FRACCION DE AUTOPISTAS CERRADAS POR MANTENIMIENTO POR AÑO (1/AÑO)
 A $RQI.K = \text{MIN} ((PSH.K + DFWF * PDFH.K + DTWF * PDTH.K)/HWYT, 1.0)$
 NOTE RQI - INDICE DE CALIDAD DE CARRETERAS (ADIMENSIONAL)
 C $DFWF = 0.5$
 NOTE DFWF - FACTOR DE PONDERACION DEFICIENTE (ADIMENSIONAL)
 C $DTWF = 0$
 NOTE DTWF - FACTOR DE PONDERACION DETERIORADO (ADIMENSIONAL)
 A $CLOS.K = LAI * LOI.K$
 NOTE CLOS - FACTOR DE NIVEL DE SERVICIO GLOBAL (ADIMENSIONAL)
 A $CLSFK = \text{TABLE} (CLSFT, CLOS.K, 0, 1, 0.1)$
 NOTE CLSF - FACTOR DE NIVEL DE SERVICIO GLOBAL
 T $CLSFT = 0, 0.63, 0.72, 0.83, 0.87, 0.90, 0.93, 0.96, 0.98, 1.00$
 NOTE CLSFT - VALORES DE TABLA PARA EL FACTOR DE NIVEL DE SERVICIO GLOBAL
 C $LAI = 0.5$
 NOTE LAI - NIVEL DEL INDICE DE DISPONIBILIDAD (ADIMENSIONAL)
 A $LOI.K = (1 - FHDMPY.K) * RQI.K$
 NOTE LOI - NIVEL DEL INDICE DE OPERACION (ADIMENSIONAL)
 A $TKL.K = \text{FFTKL} * (1 - (CLSFK * QLK.K) / (NKL * CLK)) / (1 - QKL.K / (NKL * CKL))$
 NOTE TKL - TIEMPO DE VIAJE EN ENLACE KL (MIN/MILLA)
 C $FFTKL = 0.85$
 NOTE FFTKL - TIEMPO DE VIAJE DE K A L SIN TRAFICO (MIN/MILLA)
 C $NKL = 2$
 NOTE NKL - NUMERO DE CARRILES DESDE K A L (CARRILES)
 C $CLK = 2400$

Figura 3.8.2 - MODELO DE MANTENIMIENTO DE AUTOPISTAS -

NOTE CKL - CAPACIDAD DE CARRIL EN EL ENLACE KL (VEHICULOS/HORA)
 $A \text{ QKL.K} = \text{QKLN} * (\text{CLSF.K}/\text{CLSFN})$
 NOTE QKL - VOLUMEN EN EL ENLACE DE K A L (VEHICULOS/HORA)
 $C \text{ QKLN} = 2500$
 NOTE QKLN - VOLUMEN INICIAL EN EL ENLACE DE K A L (VEHICULOS/HORA)
 $N \text{ CLOS} = \text{LAIN} * \text{LOIN}$
 NOTE CLOS - FACTOR DE NIVEL DE SERVICIO GLOBAL NORMAL (ADIMENSIONAL)
 $C \text{ LAIN} = 0.5$
 NOTE LAIN - NIVEL NORMAL DE DISPONIBILIDAD (ADIMENSIONAL)
 $N \text{ CLSFN} = \text{TABLE}(\text{CLSFNT}, \text{CLOS}, 0, 1, 0.1)$
 NOTE CLSFN - FACTOR DE NIVEL DE SERVICIO GLOBAL INICIAL (ADIMENSIONAL)
 $T \text{ CLSFNT} = 0, 0.60, 0.67, 0.74, 0.80, 0.85, 0.90, 0.93, 0.96, 0.98, 1.00$
 NOTE CLSFNT - VALORES DE TABLA PARA FACTOR DE NIVEL DE SERVICIO GLOBAL INICIAL
 $N \text{ LOIN} = \text{RQIN}$
 NOTE LOIN - INDICE DE NIVEL DE OPERACION INICIAL (ADIMENSIONAL)
 $N \text{ RQIN} = (\text{PSHN} + \text{DFWF} * \text{PDFHN} + \text{DTWF} * \text{PDTHN}) / \text{HWYT}$
 NOTE RQIN - INDICE DE CALIDAD DE CARRETERAS INICIAL (ADIMENSIONAL)
 $A \text{ UB.K} = ((\text{TKLN} - \text{TKL.K}) (\text{QKL.K} + \text{QKLN}) / 2) * \text{VOT} * \text{CFTAT}$
 NOTE UB - BENEFICIOS A LOS USUARIOS (\$/AÑO)
 $C \text{ VOT} = 0.2$
 NOTE VOT - VALOR DEL TIEMPO (\$/MIN)
 $C \text{ CFTAT} = 4000$
 NOTE CFTAT - FACTOR DE CONVERSION AL TRAFICO ANUAL EN LOS DOS SENTIDOS (HORAS/AÑO)
 $A \text{ NUB.K} = (\text{FIOTN} - \text{FIOT.K}) * \text{IO} * \text{LSDR}$
 NOTE NUB - BENEFICIOS A LOS NO USUARIOS (\$/AÑO)
 $N \text{ IO} = (\text{PCI} * \text{POP}) / (1 - \text{FIOIN})$
 NOTE IO - PRODUCCION INDUSTRIAL (\$/AÑO)
 $C \text{ PCI} = 20000$
 NOTE PCI - INGRESOS PER CAPITA (\$/AÑOS-PERSONA)
 $C \text{ POP} = 200000$
 NOTE POP - POBLACION (PERSONAS)
 $C \text{ FIOIN} = 0.7$
 NOTE FIOIN - FRACCION NORMAL DE PRODUCCION INDUSTRIAL A PRODUCTOS BASICOS (ADIMENSIONAL)
 $N \text{ LSDR} = \text{LLKL}/\text{ASD}$
 NOTE LSDR - RATIO DE ENLACES A DISTRIBUCION DE CARGA (ADIMENSIONAL)
 $C \text{ LLKL} = 100$
 NOTE LLKL - LONGITUD DE ENLACE DE K A L (MILLAS)
 $C \text{ ASD} = 400$
 NOTE ASD - DISTANCIA DE TRANSPORTE MEDIO (MILLAS)
 $A \text{ HRG.K} = \text{QKL.K} * \text{CFTAT} * \text{LLKL} * \text{TPG} / (\text{AFE} * \text{HWYT})$
 NOTE HRG - INGRESOS GENERADOS POR LAS AUTOPISTAS (\$/AÑO/CARRIL-MILLA)
 $C \text{ AFE} = 20$
 NOTE AFE - CONSUMO MEDIO COMBUSTIBLE (MILLAS/GALON)
 $C \text{ TPG} = 0.3$
 NOTE TPG - IMPUESTOS POR GALON (\$/GALON)
 $S \text{ TNB.K} = \text{UB.K} + \text{NUB.K} - \text{HME}$
 NOTE TNB - BENEFICIO NETO TOTAL (\$/AÑO)
 $N \text{ TKLN} = \text{FFTKL} * (1 - (\text{CLSFN} * \text{QKLN}) / (\text{NKL} * \text{CKL})) / (1 - \text{QKLN} / (\text{NKL} * \text{CKL}))$
 NOTE TKLN - TIEMPO DE VIAJE DE ENLACE K A L NORMAL (MIN)
 $C \text{ UMHE} = 100$
 NOTE UMHE - GASTO UNITARIO DE MANTENIMIENTO DE AUTOPISTAS (\$/AÑO/CARRIL-MILLA)
 $A \text{ FIOT.K} = \text{FIOTN} * \text{SQRT}(\text{TKL.K}/\text{TKLN})$
 NOTE FIOT - FRACCION DE PRODUCCION INDUSTRIAL A TRANSPORTE (ADIMENSIONAL)
 $N \text{ FIOT} = \text{FIOTN}$
 $C \text{ FIOTN} = 0.5$
 $A \text{ RLE.K} = \text{HRG.K} - \text{UMHE}$
 NOTE RLE - INGRESOS MENOS GASTOS (\$/AÑO/CARRIL-MILLA)
 $\text{SPEC DT} = 1 / \text{LENGTH} = 20/\text{SAVPER} = 1$
 SAVE RLE, LOI, RQI, UB, NUB, TNB, TKL, QKL, PSH, PDFH, PDTH, CLOS, FIOT, HRG, HME, PDFHT, PDTH, CLSF, FHDMPY, LAI

Figura 3.8.2 - MODELO DE MANTENIMIENTO DE AUTOPISTAS (Cont.) -

distribución de la renta y la disponibilidad de la energía. Muchos aspectos del equilibrio entre desarrollo y medio ambiente existen como secuencias permanentes de círculos viciosos, los cuales están en contraste con los círculos benignos que caracterizan un proceso saludable de desarrollo. Existe una necesidad de elaborar escenarios alternativos para su posible aplicación en los procesos de desarrollo y la evaluación de su impacto.

La formulación de un modelo de equilibrio entre el desarrollo y el medio ambiente comienza con una fórmula en la que se resumen las causas del deterioro medioambiental:

$$I = (P)(A)(T) \quad (3.9.1)$$

donde **I** es el impacto, **P** es la población, **A** es la afluencia y **T** es la tecnología. Esta fórmula manifiesta simplemente que el impacto de cualquier región o nación sobre las fuentes y sumideros del planeta es el producto de su población, su afluencia (Producto Nacional Bruto) y el daño causado por los sistemas tecnológicos que soportan esta afluencia (infraestructura). Básicamente entonces, el problema incluye cuatro componentes: (1) capital; (2) infraestructura; (3) contaminación; y (4) población. Estas cuatro variables de nivel forman los cuatro sectores del diagrama causal en la Figura 3.9.1. El capital se refiere a los medios del capital industrial que constituyen el medio para la producción industrial; las infraestructuras son las instalaciones y servicios básicos que soportan las actividades humanas; la contaminación es aquella parte de la producción industrial que cambia el medio ambiente de una forma no deseable; y la población es el componente humano del sistema, la cual se ve afectada cuantitativa y cualitativamente.

Un medio para comprender esta cuestión consiste en centrarnos sobre las interacciones resolviendo analíticamente el problema base de la Figura 3.9.1. Esto se logra analizando el sistema de realimentación negativa de segundo orden compuesto por los Sectores de Industria, Capital y Contaminación; analizando el sistema de realimentación

El análisis en equilibrio se realiza con una tasa de cambio igual a cero. Por ejemplo, de la ecuación de nivel del modelo de mantenimiento para autopistas físicamente deterioradas, PDTH:

$$PDTH.K = PDTH.J + (DT) (HD.JK - HMR.JK)$$

para que PDTH.K sea igual a PDTH.J, HD.JK debe ser igual a HMR.JK, es decir, la tasa de deterioro de autopistas HD debe ser igual a la tasa de mantenimiento de autopistas, HMR, en equilibrio o:

$$HD_e = HMR_e$$

Sustituyendo en ambos lados de las ecuaciones del modelo de mantenimiento,

$$\frac{PDFH_e}{HDETT} = \frac{HME * FEMR}{MRC}$$

Despejando para PDFH_e

$$PDFH_e = \frac{HME * FEMR * HDETT}{MRC} \text{ (millas - carril)} \quad [EQ. 1]$$

De la ecuación de nivel del modelo para PDFH_e

$$HA_e = HD_e + HOM_e$$

Sustituyendo en ambos lados de las ecuaciones del modelo de mantenimiento

$$PSH_e = HME * HAT * \left(\frac{FEMR}{MRC} + \frac{FEOM}{OMC} \right) \text{ (millas - carril)} \quad [EQ. 2]$$

El número total de millas-carril de autopista no cambiarán con el modelo de mantenimiento, ya que no se considera ninguna expansión. Es un sistema conservado, lo que significa que en cualquier instante el número de millas-carril será igual al valor inicial. En equilibrio,

$$\begin{aligned} HWYT &= PSH_e + PDFH_e + PDTH_e \quad \text{ó} \\ PDTH_e &= HWYT - PSH_e - PDFH_e \end{aligned} \quad [EQ. 3]$$

Sustituyendo las ecuaciones 1 y 2 en 3,

$$PDTH_e = HWYT - HME * \left[HAT * \left(\frac{FEMR}{MRC} + \frac{FEOM}{OMC} \right) - HDETT * \frac{FEMR}{MRC} \right] \quad [EQ. 4]$$

Definiendo la unidad de gasto de mantenimiento de autopistas como los gastos de mantenimiento de autopistas divididos por el número total de millas-carril:

$$UMHE = \frac{HME}{HWYT} \text{ (\$/milla - carril)}$$

entonces cada uno de los niveles de autopistas puede ser definido en términos de la unidad de gasto en mantenimiento de autopistas.

Dividiendo ambos lados de la ecuación 1 por HWYT,

$$\frac{PDFH_e}{HWYT} = \frac{HME}{HWYT} = \frac{FEMR * HDETT}{MRC}$$

Haciendo PDFH_e=HWYT y despejando para UMHE, en donde UMHE es el gasto máximo requerido anualmente para que todas las millas-carril alcancen un estado de autopistas físicamente deficientes. Cualquier gasto menor resultaría en que el pavimento estuviera en uno de los tres estados físicos definidos.

$$UMHE = \frac{MRC}{FEMR * HDETT} \text{ (\$/milla - carril)} \quad [EQ. 5]$$

Análogamente para la ecuación 2, dividiendo en ambos lados por HWYT,

$$\frac{PSH_e}{HWYT} = \frac{HME}{HWYT} * HAT * \left(\frac{FEMR}{MRC} + \frac{FEOM}{OMC} \right)$$

Haciendo PSH_e=HWYT, y despejando para UMHE, en donde UMHE es el valor máximo para que todas las millas-carril alcancen el estado de autopistas físicamente suficientes.

$$UMHE = \frac{MRC * OMC}{(FEMR * OMC + FEOM * MRC) * HAT} \text{ (\$/milla - carril)} \quad [EQ. 6]$$

El índice de la calidad de las carreteras en equilibrio puede determinarse en términos de la unidad de gasto de mantenimiento de autopistas,

$$RQI_e = \frac{PSH_e + DFWF * PDFH_e * DTWF * PDTH_e}{HWYT}$$

Sustituyendo las ecuaciones 1, 2 y 4 en RQI_e, se obtiene

$$RQI_e = \frac{HME}{HWYT} \left[HAT * \left(\frac{FEMR}{MRC} + \frac{FEOM}{OMC} \right) * (1 - DTWF) + \frac{FEMR * HDETT}{MRC} * (DFWF - DTWF) \right] + DTWF$$

Para simplificar, hagamos DTWF = 0; entonces,

$$RQI_e = UMHE \left[HAT * \left(\frac{FEMR}{MRC} + \frac{FEOM}{OMC} \right) + \frac{FEMR * HDETT * DFWF}{MRC} \right] \quad [EQ. 7]$$

Haciendo C₁ = $\frac{FEOM}{OMC} + \frac{FEMR}{MRC}$

y C₂ = $HAT * C_1 + \frac{FEMR * HDETT * DFWF}{MRC}$, entonces:

$$RQI_e = UMHE * C_2 \quad [EQ. 8]$$

El Nivel de Operación en estado estacionario sería una medida del nivel de mantenimiento de la red de autopistas. Para el modelo desarrollado de mantenimiento,

$$LOI_e = (1 - FHDMPY) * RQI_e$$

Sustituyendo en la ecuación

$$LOI_e = UMHE * C_2 - UMHE^2 * C_1 * C_2 \quad [EQ. 9]$$

La medida de efectividad del modelo de mantenimiento es Ingresos Menos Gastos. Es una indicación de la medida en que el mantenimiento está proporcionando a los conductores un medio de transporte físicamente suficiente, ya que la variable clave de los ingresos generados es el volumen de tráfico, QKL. Para el modelo de mantenimiento, el MOE es:

$$RLE_e = HRG_e - UMHE$$

Sustituyendo en esta ecuación y haciendo

$$C_3 = \frac{QKLN * CFTAT * LLKL * TPG}{AFE * HWTY} \text{ , entonces:}$$

$$RLE_e = C_1 * \frac{CLOS_e}{CLOSN} - UMHE \text{ con } CLOS = LAI * LOI$$

Sustituyendo la ecuación 9,

$$RLE_e = C_3 * \left[\frac{LAI * (UMHE * C_2 - UMHE^2 * C_1 * C_2)}{LAIN * RQIN} \right] - UMHE \quad [EQ. 10]$$

Esto permite representar gráficamente los estados de equilibrio o estacionarios, para visualizar el efecto en Ingresos Menos Gastos de aumentar los gastos de mantenimiento, teniendo en cuenta que la principal variable es el tráfico, ya que

$$QKL_e = QLKN * \frac{CLOS_e}{CLOSN}$$

A medida que el Nivel Global de Servicio aumenta por encima del valor inicial CLOS, el volumen de tráfico aumenta. Los siguientes parámetros iniciales adicionales fueron utilizados para representar RLE en función de UMHE.

VARIABLES	VALOR INICIAL
QKLN	3000 veh/hr
CFTAT	4000 hrs
TPG	\$0.30
AFE	20 MPG
HWYT	400 millas-carril
LLKL	100 millas
LAI	0.2
LAIN	0.2
RQIN	625

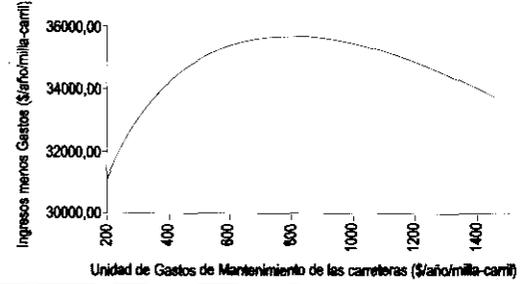


Figura 3.8.3 - ANÁLISIS DE EQUILIBRIO -

positiva de segundo orden compuesto por los Sectores de Capital Industrial y de Infraestructura, y luego sintetizando estos en una expresión global para la contaminación, expresada en función del capital, la infraestructura y la población (Figura 3.9.2). Un segundo método complementario consiste en refinar un modelo detallado de simulación, tal como el modelo nacional descrito en la Sección 3.4 [20].

3.10 Desarrollo mundial

El desarrollo es un término genérico asociado normalmente con conceptos tales como el desarrollo regional, el desarrollo nacional, el desarrollo urbano, el desarrollo rural y el desarrollo de recursos. Actualmente esta expresión se asocia con las inquietudes internacionales por el desarrollo global, el cual se centra normalmente en cuestiones económicas y demográficas.

La expresión «economía mundial» apareció por primera vez en Alemania en vísperas de la Primera Guerra Mundial, cuando el Káiser Guillermo II se estaba preparando para desafiar el dominio político y económico del Imperio Británico. En los siguientes 60 años Alemania perdería dos guerras, Gran Bretaña perdería su imperio, y la idea de un mundo integrado por economías nacionales autosuficientes y autónomas iría palideciendo hasta convertirse en una abstracción.

Una demostración dramática del grado de interdependencia global que existe hoy la proporcionó la «crisis del petróleo», cuyos efectos directos e indirectos se hicieron sentir en todos los rincones del planeta. La economía mundial se ha convertido en una realidad tangible, y en la actualidad su característica principal es la diferencia de renta (y por tanto del nivel de vida) entre los países menos desarrollados del mundo y los más ricos y altamente industrializados.

En los años setenta se emprendieron varias iniciativas para desarrollar modelos con los que ganar una mayor comprensión del

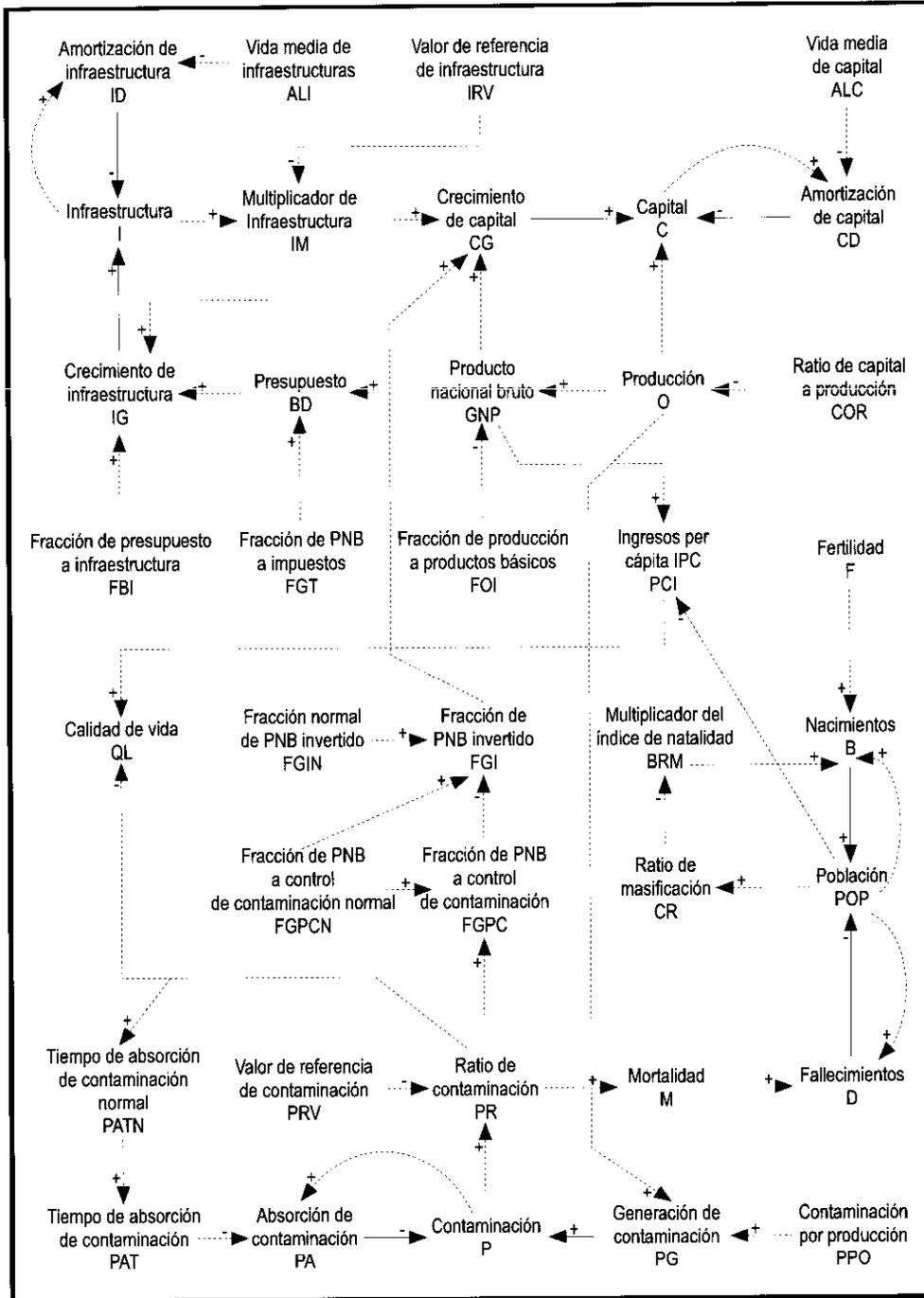


Figura 3.9.1 - DIAGRAMA CAUSAL DE INTERACCIONES DEL DESARROLLO Y MEDIOAMBIENTE -

Es provechoso realizar análisis intra e intersectoriales en partes del modelo, como medio de llegar a una solución analítica del Modelo Base.

Considérese el Sector de Población. La ecuación de nivel es

$$POP_t = POP_{t-1} + (dt)(B_t - D_t)$$

La ecuación diferencial del Sector de Población es

$$dPOP_t / dt = B_t - D_t$$

Repetidas sustituciones en el lado derecho, luego por separación de variables se obtiene la solución

$$POP_t = POP_e - (POP_e - POP_0) e^{-Mt}$$

donde POP_e representa el valor de estado estacionario de la Población dado por

$$POP_e = POP_0 \times F / M$$

A continuación analizamos el bucle de segundo orden de realimentación negativa que conecta los Sectores Industrial y de Contaminación. Las soluciones de Capital C, y Contaminación P, son:

$$P_t = P_e + \frac{1}{\omega} \frac{PPO}{COR} (C_0 - C_e) \sin \omega t + (P_0 - P_e) \cos \omega t$$

$$C_t = C_e + (C_0 - C_e) \cos \omega t - \frac{COR}{PPO} (P_0 - P_e) \sin \omega t$$

$$\text{donde } \omega = \sqrt{\frac{(1-FOI)FGPCN}{COR \times PATN}} \sqrt{IM}$$

$$P_e = PRV \left(1 + \frac{FGIN}{FGPCN} - \frac{COR}{ALC(1-FOI)FGPCN \cdot IM} \right)$$

$$C_e = \frac{PRV \cdot COR}{PATN \cdot PPO}$$

A continuación consideramos el Sector Industrial, referente a la variable de nivel C, y el Sector de Infraestructura, referente a la variable de nivel I. Cada uno tiene dos bucles de realimentación de primer orden, uno positivo y otro negativo. Sin embargo, estos dos Sectores considerados conjuntamente forman un bucle de realimentación positiva de segundo orden, con la siguiente solución

$$C_t = C_e + C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t}$$

$$I_t = I_e + \frac{ALI \cdot FGT \cdot FBI}{FGI} (C_1 \omega e^{\omega t} - C_2 \omega e^{-\omega t})$$

$$\text{donde } C_1 = \frac{1}{2} \left[(C_0 - C_e) + \frac{FGI}{ALI \cdot FGT \cdot FBI} (I_0 - I_e) \right]$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left[(C_0 - C_e) - \frac{FGI}{ALI \cdot FGT \cdot FBI} (I_0 - I_e) \right]$$

$$\omega = (ALI \cdot ALC)^{-1/2}$$

$$C_e = \frac{COR \cdot IRV}{ALI(1-FOI)FGT \cdot FBI}$$

$$I_e = \frac{COR \cdot IRV}{ALC(1-FOI)FGI}$$

Una solución aproximada al Modelo Base completo mostrado en la Figura 3.9.1, obtenida tratando IM como una variable dependiente del tiempo, es

$$IM = \frac{I_t}{IRV} = \frac{I_e}{IRV} - \frac{ALI \cdot FGT \cdot FBI}{FGI \cdot IRV} (C_1 \omega e^{\omega t} - C_2 \omega e^{-\omega t})$$

$$P_t = \left[\left(K_1 - K_2 \frac{1}{\sqrt{IM}} \right) + K_3 \frac{1}{IM} \sin \omega t + \left(K_4 - K_2 \frac{1}{IM} \right) \cos \omega t \right] \cdot (POP_t / POP_e)$$

Figura 3.9.2 - SOLUCIÓN ANALÍTICA AL DESARROLLO SOSTENIBLE -

«problema mundial». La tercera aplicación de Forrester de la dinámica de sistemas trata de la simulación de las fuerzas ecológicas principales que afectan al mundo de hoy. Este modelo y sus análisis son el tema de un libro titulado apropiadamente «World Dynamics» (Dinámica del Mundo) [21].

Forrester eligió cinco «niveles» como los cimientos sobre los que construir la estructura del sistema mundial: (1) la población; (2) la inversión de capitales; (3) los recursos naturales; (4) la contaminación; y (5) la fracción del capital dedicada a la agricultura. Debido a que el modelo proporcionaba una posible explicación de muchos problemas importantes asociados con el crecimiento global de la población y el desarrollo económico, el Club de Roma patrocinó un proyecto en el M.I.T. (Instituto Tecnológico de Massachusetts) para probar y ampliar el modelo de forma que produjera análisis más detallados de los agentes tecnológicos, económicos y políticos que conducen a tensiones sociales. Los resultados de este trabajo se resumen en tres libros: (1) «The Limits of Growth» (Los Límites del Crecimiento) [22], un informe general, no técnico, sobre la investigación; (2) «Toward Global Equilibrium» (Hacia un Equilibrio Global) [23], una recopilación de 13 artículos en los que se identifican y tratan problemas específicos relacionados con el crecimiento (y por tanto con el desarrollo); y (3) «Dynamics of Growth in a Finite World» (Dinámica del Crecimiento en un Mundo Finito) [24], una presentación técnica del modelo dinámico del mundo más reciente, denominado «World 3» (Mundo 3).

En 1973, para proporcionar una base cuantitativa a esta investigación, las Naciones Unidas, con un apoyo financiero especial de Holanda, encargaron la construcción de un modelo de la economía mundial de uso general. Para transformar el vasto conjunto de hechos microeconómicos que describen la economía mundial en un sistema organizado a partir del cual se pudieran hacer previsiones microeconómicas sobre el crecimiento futuro, el modelo debía basarse en el método de entradas y salidas (input-output) o análisis interindustrial. En este modelo, el mundo se visualiza como un conjunto

formado por 15 regiones geográficas diferenciadas. Con el fin de presentar e interpretar los resultados de las previsiones económicas globales realizadas a nivel regional, se hizo conveniente diferenciar las 15 regiones en tres categorías principales: las regiones desarrolladas, las regiones menos desarrolladas y ricas en recursos, y las regiones menos desarrolladas y pobres en recursos [25].

Se han desarrollado muchos modelos del mundo, y aunque difieren en metodología, todos llegan a la conclusión de que la clave del desarrollo mundial es la población. En el minuto próximo nacerán 268 niños. Morirán 98 personas. La aritmética es simple, pero impresionante: la población mundial está creciendo a un ritmo de 170 personas por minuto, tan rápidamente que el número de habitantes en un planeta ya superpoblado podría aumentar en más del doble, desde los 5,6 mil millones actuales hasta 12,5 mil millones, en el 2050. Estos números impresionantes son el núcleo de un problema tan extendido que, aunque la mayoría de la gente no lo ve directamente, afecta a todo, desde la calidad del aire que respiramos y el agua que bebemos, hasta los recursos y estabilidad mundiales.

Un modelo de la población mundial simple pero instructivo se presenta en el diagrama causal de la Figura 3.10.1, y las ecuaciones DYNAMO del mismo se muestran en la Figura 3.10.2. En este Modelo de la Población Mundial hemos seguido la orientación de algunos de los modelos mundiales anteriores, y hemos dividido el mundo en tres categorías de desarrollo: (1) países desarrollados; (2) países en vías de desarrollo y ricos en recursos; y (3) países subdesarrollados y pobres en recursos. Las soluciones de estado estacionario y analíticas se llevan a cabo en la Figura 3.10.3, y los resultados se muestran gráficamente en la Figura 3.10.4. Vemos que el número masivo de habitantes en el mundo es sólo parte del problema; éste es exacerbado por la distribución de la población. La ciencia y la tecnología pueden conseguir muchísimas cosas, pero lo que no pueden hacer es conseguir que unos recursos finitos mantengan a una población infinita.

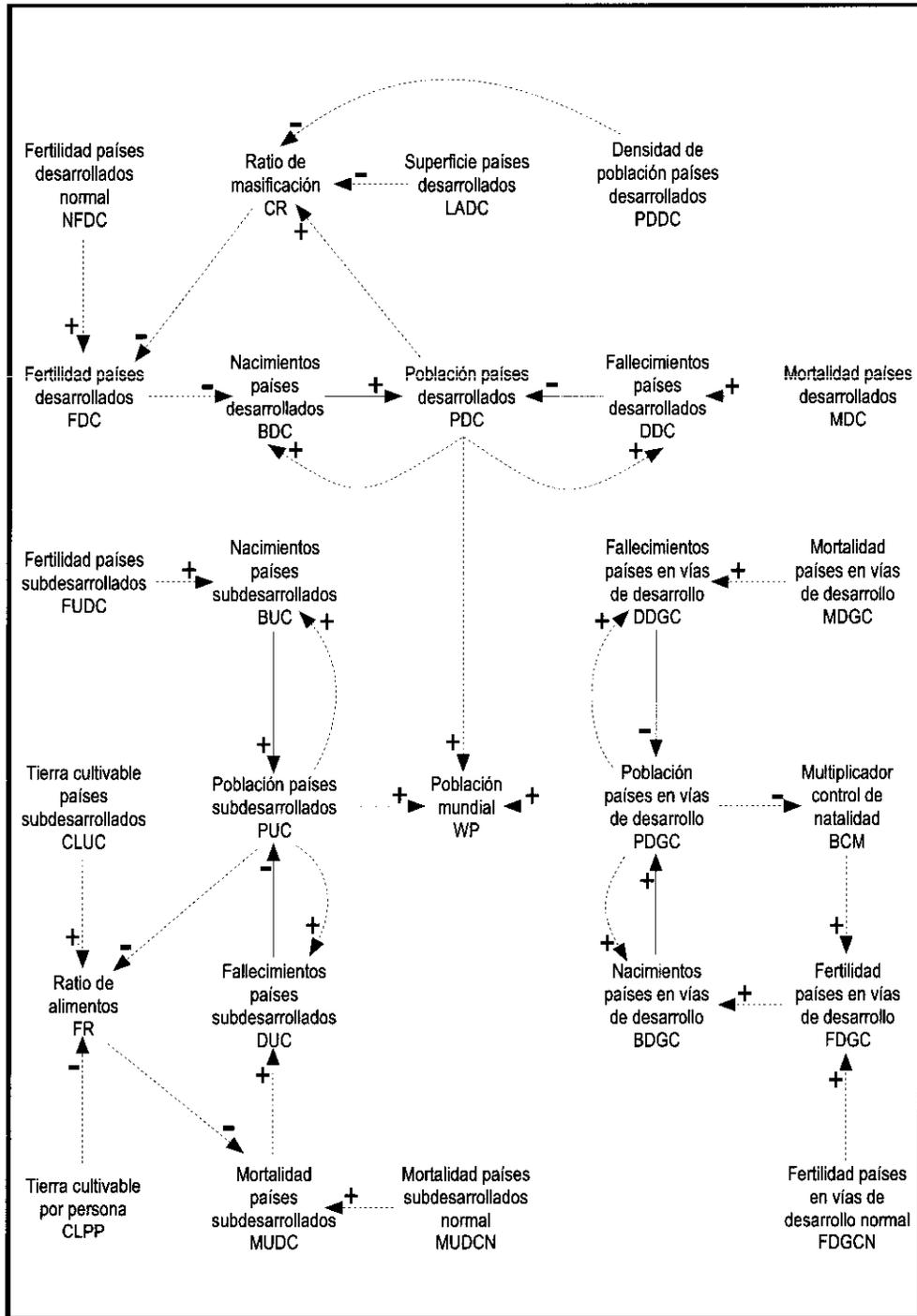


Figura 3.10.1 - DIAGRAMA CAUSAL PARA MODELO DE POBLACIÓN MUNDIAL -

3.11 Resumen

Las infraestructuras son la base para el desarrollo económico y social. Hacen posible las agrupaciones humanas y son indispensables para el comercio y la industria. A pesar de esto, la complejidad y la naturaleza multifuncional de las instalaciones y servicios que constituyen las infraestructuras de una región están pobremente reflejadas en la administración de un sistema. En la mayoría de las regiones, los distintos componentes de las infraestructuras (por ejemplo, el transporte, el suministro de agua, la eliminación de residuos) se administran por separado, con pocos medios efectivos de llevar a cabo las compensaciones mutuas entre los mismos. Aunque cada componente proporciona servicios de una importancia única, las distintas partes de la infraestructura funcionan como un sistema que proporciona servicios de apoyo a un amplio número de actividades económicas y sociales, un medio ambiente fundamental para el crecimiento económico y una mayor calidad de vida.

Las obras y los servicios públicos eficaces tienen una importancia crucial y requieren un porcentaje significativo de los gastos de la sociedad. No obstante, no es el dinero lo que determina esencialmente la eficacia de los sistemas de obras públicas, sino la gente. La planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de las obras públicas siempre han requerido un alto nivel de formación y cualificación en varias disciplinas. El crecimiento vertiginoso de los costes del gobierno, los rápidos avances en ciencia y tecnología, y la necesidad apremiante de obras públicas al servicio de una creciente población urbana, han hecho imperativo que los responsables de las obras públicas sean capaces de responder al conjunto de factores sociales, económicos, medioambientales y políticos inherentes a la planificación de programas, elección de políticas y administración de proyectos. Por estas razones, los ingenieros de sistemas tienen que desempeñar un papel clave en las actividades relativas a las infraestructuras. En este Capítulo hemos visto cómo el ciclo de vida

A $WP.K = PDC.K + PDGC.K + PUC.K$
 NOTE WP - POBLACION MUNDIAL (PERSONAS)
 L $PDC.K = PDC.J + (DT) (BDC.JK - DDC.JK)$
 NOTE PDC - POBLACION PAISES DESARROLLADOS (PERSONAS)
 C $PDCN = 1.0E9$
 NOTE PDCN - POBLACION PAISES DESARROLLADOS INICIAL (PERSONAS)
 R $BDC.KL = PDC.K * FDC.K$
 NOTE BDC - NACIMIENTOS PAISES DESARROLLADOS (PERSONAS/AÑO)
 R $DDC.KL = PDC.K * MDC$
 NOTE DDC - FALLECIMIENTOS PAISES DESARROLLADOS (PERSONAS/AÑO)
 C $MDC = 0.0125$
 NOTE MDC - MORTALIDAD PAISES DESARROLLADOS (1/AÑO)
 A $FDC.K = FDCN / CR.K$
 NOTE FDC - FERTILIDAD PAISES DESARROLLADOS (1/AÑO)
 C $FDCN = 0.0150$
 NOTE FDCN - FERTILIDAD PAISES DESARROLLADOS NORMAL (1/AÑO)
 A $CR.K = PDC.K / (LADC * PDDC)$
 NOTE CR - RATIO DE MASIFICACION (ADIMENSIONAL)
 C $LADC = 20E6$
 NOTE LADC - SUPERFICIE PAISES DESARROLLADOS (MILLAS CUADRADAS)
 C $PDDC = 50$
 NOTE PDDC - DENSIDAD DE POBLACION PAISES DESARROLLADOS
 NOTE (PERSONAS/MILLA CUADRADA)
 L $PDGC.K = PDGC.J + (DT) (BDGC.JK + DDGC.JK)$
 N $PDGC = PDGCN$
 NOTE PDGC - POBLACION PAISES EN VIAS DE DESARROLLO (PERSONAS)
 C $PDGCN = 3.0E9$
 NOTE PDGCN - POBLACION PAISES EN VIAS DE DESARROLLO INICIAL (PERSONAS)
 R $BDGC.KL = PDGC.K * FDGC.K$
 NOTE BDGC - NACIMIENTOS PAISES EN VIAS DE DESARROLLO (PERSONAS/AÑO)
 A $FDGC.K = FDGCN * BCM.K$

Figura 3.10.2 - ECUACIONES DYNAMO PARA MODELO DE POBLACIÓN MUNDIAL -

NOTE FDGC - FERTILIDAD PAISES EN VIAS DE DESARROLLO (1/AÑO)
 C FDGCN = 0.0333
 NOTE FDGCN - FERTILIDAD PAISES EN VIAS DE DESARROLLO NORMAL (1/AÑO)
 R DDGC.KL = PDGC.K * MDGC
 NOTE DDGC - FALLECIMIENTOS PAISES EN VIAS
 NOTE DE DESARROLLO (PERSONAS/AÑO)
 C MDGC = 0.0133
 NOTE MDGC - MORTALIDAD PAISES EN VIAS DE DESARROLLO (1/AÑO)
 A BCM.K = PDGCN / PDGC.K
 NOTE BCM - MULTIPLICADOR DE CONTROL DE NATALIDAD (ADIMENSIONAL)
 L PUC.K = PUC.J + (DT) (BUC.JK - DUC.JK)
 N PUC = PUCN
 NOTE PUC - POBLACION PAISES SUBDESARROLLADOS (PERSONAS)
 C PUCN = 1.5E9
 NOTE PUCN - POBLACION PAISES SUBDESARROLLADOS INICIAL (PERSONAS)
 R BUC.KL = PUC.K * FUDC
 NOTE BUC - NACIMIENTOS PAISES SUBDESARROLLADOS (PERSONAS/AÑOS)
 C FUDC = 0.0600
 NOTE FUDC - FERTILIDAD PAISES SUBDESARROLLADOS (1/AÑO)
 R DUC.KL = PUC.K * MUDC.K
 NOTE DUC - FALLECIMIENTOS PAISES SUBDESARROLLADOS (PERSONAS/AÑO)
 A MUDC.K = MUDCN / FR.K
 NOTE MUDC - MORTALIDAD PAISES SUBDESARROLLADOS (1/AÑO)
 A FR.K = CLUC / (PUC.K * CLPP)
 NOTE FR RATIO ALIMENTOS (ADIMENSIONAL)
 C CLUC = 1.5E9
 NOTE CLUC - TIERRA CULTIVABLE PAISES SUBDESARROLLADOS (ACRES)
 C CLPP = 1.0
 NOTE CLPP - TIERRA CULTIVABLE POR PERSONA (ACRES/PERSONA)
 C MUDCN = 0.0150
 NOTE MUDCN - MORTALIDAD PAISES SUBDESARROLLADOS NORMAL (1/AÑO)

Figura 3.10.2 - ECUACIONES DYNAMO PARA MODELO DE POBLACIÓN MUNDIAL (Continuación) -

PARA LAS ECUACIONES DE NIVEL, FIJAR LOS FLUJOS DE ENTRADA IGUALES A LOS DE SALIDA CON LO QUE SE OBTIENE

$$BUC_e = DUC_e$$

$$BDGC_e = DDGC_e$$

$$BDC_e = DDC_e$$

LA SUSTITUCIÓN REPETIDA EN CADA LADO DE LAS ECUACIONES RESPECTIVAS DA

$$(PUC_e)(FUDC) = (PUC_e)(MUDC_e)$$

$$(PDGC_e)(FDGC_e) = (PDGC_e)(MDGC_e)$$

$$(PDC_e)(FDC_e) = (PDC_e)(MDC_e)$$

$$FUDC = MUDCN / FR_e$$

$$(FDGC_e)(BCM_e) = MDGC_e$$

$$FDC_e / CR_e = MDC_e$$

$$FR_e = MUDCN / FUDC$$

$$BCM_e = MDGC_e / FDGC_e$$

$$CR_e = FDC_e / MDC_e$$

$$CLUC_e / ((PUC_e)(CLPP)) = MUDCN / FUDC \quad PDGC_e / PDGC_e = MDGC_e / FDGC_e \quad PDC_e / ((LADC)(PDDC_e)) = FDC_e / MDC_e$$

AL RESOLVER LAS FORMAS DE ESTADO ESTACIONARIO DE LAS VARIABLES DE NIVEL SE OBTIENE

$$PUC_e = (FUDC / MUDCN)(CLUC_e / CLPP)$$

$$PDGC_e = (PDGC_e)(FDGC_e / MDGC_e)$$

$$PDC_e = (PDC_e)(FDC_e / MDC_e)$$

AL SUSTITUIR EN LAS ECUACIONES DE ESTADO ESTACIONARIO LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS DA

$$PUC_e = 4E9$$

$$PDGC_e = 7.5E9$$

$$PDC_e = 1.2E9$$

- ANÁLISIS DE ESTADO ESTACIONARIO -

AL EXPRESAR LAS ECUACIONES DE NIVEL EN FORMA DE ECUACIÓN DIFERENCIAL:

$$dPUC_e / dt = BUC_e - DUC_e$$

$$dPDGC_e / dt = BDGC_e - DDGC_e$$

$$dPDC_e / dt = BDC_e - DDC_e$$

LA SUSTITUCIÓN REPETIDA EN EL LADO DERECHO DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DA:

(ver siguiente página)

- ANÁLISIS TRANSITORIO -

Figura 3.10.3. - SOLUCIÓN ANALÍTICA PARA EL MODELO DE POBLACIÓN MUNDIAL -

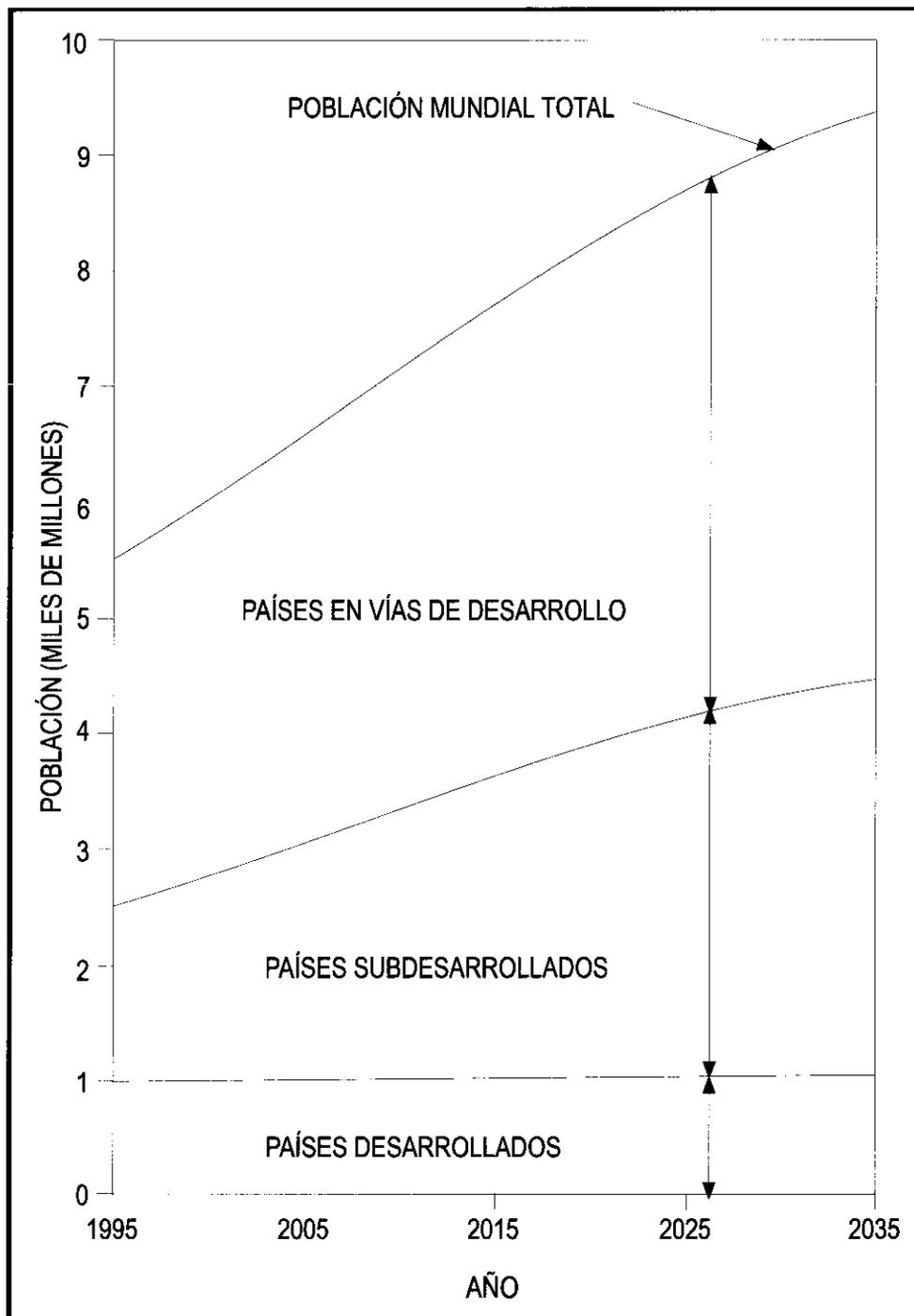


Figura 3.10.4 - RESULTADOS DEL MODELO DE POBLACIÓN MUNDIAL -

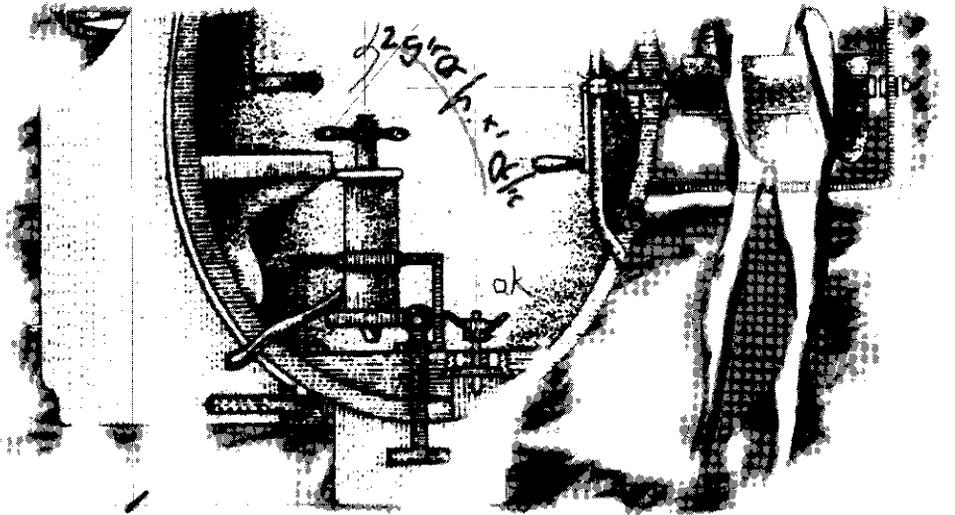
de las infraestructuras puede ser estudiado por modelos matemáticos y por análisis de sistemas.

Un análisis del tipo descrito en este Capítulo debe necesariamente trazar imágenes con unas pocas pinceladas maestras, ya que trata de las manifestaciones del desarrollo a nivel regional y nacional, y de las perspectivas generales del desarrollo de la economía mundial. A pesar de esto, un modelo que puede describir el bosque en función de los árboles individuales (o como mínimo en función de las relaciones estructurales específicas entre diversas partes del bosque) es una herramienta valiosa para diseñar escenarios posibles para el futuro.

Además de sus conocimientos para el desarrollo de modelos, el ingeniero de sistemas proporciona una perspectiva nueva que sirve de guía para un desarrollo sustancial. Dada la escasez actual de recursos financieros y la creciente competencia por los mismos, el desafío no se dará en el campo de la ingeniería convencional, en el sentido estrecho del término. Para recaudar los fondos financieros necesarios, los ingenieros deben desarrollar nuevas relaciones con los políticos y la población en general. Las opciones de inversión deben debatirse de forma participativa, para asegurar que las soluciones no sólo sean técnicamente eficaces, sino también aceptables desde el punto de vista social, económico y medioambiental. Esto tendrá como resultado una mejor operación y mantenimiento de las infraestructuras desarrolladas, y una mayor posibilidad de soportar las inversiones.

4

Dinámica de sistemas militares



4.1 Introducción

La guerra y los juegos de guerra son anteriores a la historia escrita. Juegos de guerra sobre tableros, representaciones simbólicas de soldados y equipamientos militares han sido descubiertos en exploraciones arqueológicas en Grecia, Egipto, Persia, China e India. Juegos parecidos al ajedrez, que se cree que eran juegos de guerra, eran utilizados por los antiguos indios, iraquíes, chinos, japoneses y otros [28]. Puesto que la guerra es una de las actividades humanas más antiguas, en la que se consumen grandes recursos, no es sorprendente que hayan existido siempre sustitutos de la misma. Con su resultado, ya fuera la victoria o la derrota, se producen grandes cambios sociales y materiales. Son estos los que conducen al hombre a investigar métodos con los que se puedan predecir las consecuencias de sus acciones.

Estas consideraciones proporcionan la justificación para un examen de los factores implicados en el combate, ya sean grandes o pequeños. El método seguido en este trabajo será matemático. Una batalla es un fenómeno extremadamente complejo en el que influyen muchos factores intangibles, además de los factores identificados generalmente, como son la eficacia del armamento y el tamaño de las fuerzas. En la mayoría de los casos, un enfoque matemático que se espera sea lo suficientemente simple para ser abordable tiene que dejar muchos de estos factores fuera de consideración. Esto puede reducir de forma considerable la utilidad del método para hacer

previsiones precisas. Su papel más significativo, no obstante, se refiere a su gran potencial para resaltar las relaciones existentes entre los factores clave, y para determinar como éstos son afectados por el cambio de las tácticas empleadas. La importancia de estas relaciones no estriba tanto en el uso que los jefes hagan de ellas en el campo de batalla, sino en la ayuda que proporciona a los estrategas militares a largo plazo para diferenciar entre muchos cursos de acción posibles.

La utilización de la teoría de juegos para estudiar las guerras contemporáneas ha evolucionado rápidamente en los últimos años. En los años 60 y 70 se dieron pasos decisivos, debidos a los progresos en la tecnología de los ordenadores, y al desarrollo de métodos y herramientas más potentes que pueden aplicarse a una gama más extensa de materias. En las últimas dos décadas ha tenido lugar una tremenda expansión el papel y la influencia de los métodos por ordenador como un mecanismo de «ayuda a las decisiones políticas»; primero en el análisis de cuestiones de seguridad nacional, y ahora para el análisis de problemas que se plantean en todos los asuntos de un gobierno.

Mientras que el alcance y la importancia de los modelos militares han aumentado a lo largo de los siglos, reducidos a sus elementos básicos, la más sofisticada representación por ordenador de una situación de conflicto tiene los mismos ingredientes clave: dos lados, un contexto, normas y limitaciones, y varios escenarios que pueden tener lugar cuando llega el momento de empezar a librar plenamente el combate.

4.2 Modelo de combate

Para empezar a comprender los modelos de combate, es útil pasar revista a varios conceptos básicos. En términos sencillos, todo combate implica la interacción entre dos fuerzas opuestas, que pueden

designarse como ROJOS y AZULES, IVÁN y SAM, o simplemente X y \$. Las fuerzas están compuestas por hombres y material, reguladas por procedimientos operativos, e incluyen algunas medidas de apoyo de combate. Ambas fuerzas funcionan en un entorno operativo, compuesto por factores naturales tales como las condiciones climatológicas y del terreno. Las interacciones entre IVÁN y SAM afectan, y son afectadas, por factores como los siguientes:

- Mando y Control (misiones, composición de las fuerzas, unidades de apoyo, plan de batalla, tiempo de batalla, y disposición).
- Logística (suministros, transporte, servicios médicos, instalaciones de mantenimiento y construcción).
- Atrición o Pérdidas de Combate, en las que se incluyen:
 - * características de las armas y de los objetivos (aire-aire, aire-tierra, tierra-aire, y tierra-tierra);
 - * características de las municiones (precisión, teledirigidas o de vuelo libre, de fragmentación o sólidas, etc.).
 - * características del combate (visibilidad, alcance, altitud, etc.).

Las interacciones entre IVÁN y SAM determinan el resultado de las acciones de combate, que de forma rutinaria se mide de varias formas:

- Movimiento de la Zona Avanzada del Área de Combate (FEBA).
 - Atrición (de personal y/o de los armamentos, incluidos la destrucción y los daños).
 - Consumo de Recursos (gasto de munición, consumo de combustible, suministros consumidos y coste de los equipos).
-

Los resultados de los modelos toman normalmente la forma de informes periódicos de la situación en los que se da la evolución de la batalla en el tiempo. La iteración de este proceso a lo largo de un número determinado de días produce una historia de la guerra en el tiempo. Estos modelos se pueden emplear para obtener la comprensión de cuestiones relativas a:

- elección entre sistemas comparables de armamentos,
- uso de sistemas no comparables,
- estructuras de fuerzas tales como la elección de combinaciones de organizaciones y fuerzas, y/o
- nivel de fuerzas: es decir, ¿cuánto es bastante?

Los modelos de combate se pueden clasificar con relación a los niveles de desagregación. Los modelos agregados y detallados incorporan representaciones fundamentalmente diferentes del combate. Los modelos agregados pueden incorporar tipos análogos de armamento, o suponer que todas las fuerzas están concentradas en un punto. En contraste, los modelos detallados proporcionan una representación más definitiva del combate. Obviamente, cuanto más detallado sea el modelo, más explícito será el juicio del autor del modelo, y mayor será la capacidad de modificar parámetros críticos para reflejar cambios de táctica y de doctrina de combate. No obstante, es igualmente obvio que alguna agregación es necesaria para hacer el modelo controlable.

Las batallas se libran tanto en el tiempo como en el espacio. El proceso de desarrollo de modelos, además de tener en cuenta la representación espacial de las fuerzas, tiene básicamente que dividir el tiempo en intervalos o períodos discretos. Las condiciones iniciales al principio de un período se utilizan para predecir lo que va a pasar durante dicho período y los resultados obtenidos se transforman en las condiciones iniciales para el período siguiente. El equilibrio usual entre la agregación y el detalle se aplica en la selección del intervalo de solución de un modelo.

4.3 Modelos clásicos de atrición

El método utilizado para desarrollar un modelo de atrición domina todas las fases de un modelo de combate. No sólo determina los ganadores y perdedores y el movimiento de la línea del frente, sino que también determina el nivel de bajas, las pérdidas de equipo, el consumo de munición y las necesidades de suministros y refuerzos. Con el fin de que un modelo matemático pueda ser desarrollado de manera concisa, es necesario que definamos los conceptos fundamentales. Una «fuerza» es un cuerpo o conjunto de unidades organizadas de combate. Estas «unidades de combate» pueden constar de hombres, barcos, aviones, tanques o cualquier otro componente capaz de contribuir a la victoria de su bando. Hay muchos factores que contribuyen a esta capacidad. Estos pueden incluir la eficacia del armamento, su velocidad, maniobrabilidad, vulnerabilidad, etc. Se asume que una unidad de combate es destruida cuando ya no tiene capacidad para contribuir al éxito de su propio bando.

Dos adversarios, IVÁN y SAM, cada uno con una fuerza desplegada, están en combate, que termina cuando una de las dos fuerzas rompe el contacto. Se estima que ha ganado la batalla la fuerza que no interrumpe el combate. Las propiedades de las unidades de combate pueden resumirse en dos conjuntos de constantes llamados «coeficientes de combate»; la velocidad con que una fuerza de combate disminuye se denomina «velocidad de atrición». La formulación de un modelo para una situación particular depende de factores como los tipos de unidades implicadas y de armamento disponible, y de las tácticas empleadas por cada bando. Habiéndose determinado la interacción entre los oponentes, se considera el tipo de análisis matemático que va a intentarse, así como sus objetivos.

El enfoque más famoso para desarrollar modelos de atrición fue introducido por Frederick W. Lanchester [27], quién en la Primera

Guerra Mundial intentó describir la guerra por medio de sistemas de ecuaciones diferenciales. Estos sistemas se conocen como la ley lineal de Lanchester y la ley cuadrática de Lanchester. La primera es la representación de una batalla en la que no hay concentración de fuerzas, sino que es un área de fuego donde los que disparan no saben cuándo destruyen un objetivo. La ley cuadrática es una representación de la concentración de fuerzas, o de fuego dirigido; es decir, los que disparan saben cuándo un objetivo ha sido destruido y concentran su fuego en los supervivientes.

Supongamos que S y X son los dos oponentes, S_0 y X_0 sus fuerzas respectivas, y S_t y X_t sus fuerzas en el tiempo t después del comienzo del conflicto. La velocidad de atrición de S_t y X_t está gobernada por ecuaciones diferenciales del tipo siguiente:

$$\frac{dS_t}{dt} = -Q(S_t) - B(X_t) - U(X_t)(S_t) \quad (4.3.1)$$

y

$$\frac{dX_t}{dt} = -P(S_t) - C(S_t) - V(X_t)(S_t) \quad (4.3.2)$$

Los primeros términos en las ecuaciones corresponden a la atrición durante la interdicción de objetivos, el segundo término corresponde a la atrición debida al fuego dirigido, y el tercer término a la atrición debida al fuego indiscriminado. Los parámetros Q y P son factores de atrición de las fuerzas amigas S y las fuerzas enemigas X , respectivamente; los parámetros B y C son factores de efectividad de las unidades de las fuerzas enemigas y amigas, respectivamente; y los parámetros U y V son factores de efectividad de la interacción para el fuego del área. Los seis parámetros son funciones de la disponibilidad del sistema de armamentos, de su utilización (frecuencia de misiones) y de su supervivencia y/o efecto mortífero. Se han resuelto cuatro casos especiales de un interés particular. Estos se resumen en la Figura 4.3.1. En las Secciones siguientes se presentan ejemplos de cada caso especial.

CUATRO CASOS ESPECIALES DE MODELO DE ATRICIÓN GENERAL

1. MISIÓN DE INTERDICCIÓN DE OBJETIVO ($B = C = U = V = 0$).

SOLUCIÓN TRANSITORIA:

$$S_t = S_0 e^{-Qt} \text{ y } X_t = X_0 e^{-Pt}$$

2. SUPRESIÓN DE AMENAZAS DEBIDO A FUEGO DIRIGIDO ($Q = P = U = V = 0$).

TRANSITORIO:

$$S_t = S_0 \cosh B C t - X_0 B / C \sinh B C t$$

$$X_t = X_0 \cosh B C t - S_0 C / B \sinh B C t$$

ECUACIÓN DE ESTADO:

$$C(S_0^2 - S_t^2) = B(X_0^2 - X_t^2)$$

3. SUPRESIÓN DE AMENAZA CON FUEGO DE ZONA ($Q = P = B = C = 0$).

TRANSITORIO:

$$S_t = \begin{bmatrix} X_0 U - S_0 V \\ X_0 U e^{(X_0 U - S_0 V)t} - 1 \\ S_0 V \end{bmatrix} V = \frac{S_0(S_0 V - X_0 U)}{X_0 U e^{(X_0 U - S_0 V)t} - S_0 V}$$

ECUACIÓN DE ESTADO

$$V(S_0 - S_t) = U(X_0 - X_t)$$

4. MISIÓN COMBINADA DE INTERDICCIÓN / SUPRESIÓN

$$S_t = \frac{(B)(X_0)(e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) + S_0[(Q + \lambda_1)e^{\lambda_1 t} - (Q + \lambda_2)e^{\lambda_2 t}]}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

$$X_t = \frac{-\frac{S_0}{B}(Q + \lambda_1)(e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) + X_0[(\lambda_1 + Q)e^{\lambda_1 t} - (Q + \lambda_2)e^{\lambda_2 t}]}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

DONDE:

$$\lambda_1 = \frac{-(Q + P) + (Q - P)^2 + 4(B)(C)}{2}$$

$$\lambda_2 = \frac{-(Q + P) - (Q - P)^2 + 4(B)(C)}{2}$$

LOS DESARROLLOS DE ESTOS CASOS SE DAN EN EL APENDICE B.

Figura 4.3.1 - CASOS ESPECIALES DE ATRICIÓN -

4.4. Interdicción de objetivos

Las características únicas del helicóptero han revolucionado el campo de batalla moderno de muchas formas: puede concentrar el fuego en puntos críticos de forma rápida y transportar tropas totalmente equipadas a donde sean necesarias, así como mantenerlas suministradas. El helicóptero de combate realiza muchas misiones: antitanques, apoyo de fuego a la infantería, exploración y reconocimiento generales, control avanzado desde el aire, localización de la artillería, utilización como puesto de mando en el aire, apoyo logístico y, por último, es un arma de batalla por sí mismo. La forma en que se utilice dependerá del papel específico que le haya sido encomendado, su armamento, la situación táctica y la doctrina operacional del país en guerra. Tres de estas misiones son: la misión antitanque, la misión antihelicóptero y la misión contra aviones. Consideremos la primera de ellas.

El armamento de un helicóptero antitanque o de ataque varía, pero incluye generalmente misiles teledirigidos antitanque, guiados ópticamente o por láser; montajes de misiles balísticos; conjuntos de cohetes balísticos; y un cañón o una ametralladora pesada apuntando hacia delante. La doctrina americana sobre el helicóptero de ataque da énfasis a evitar la detección, a utilizar la suspensión inmóvil en el aire y pequeños desplazamientos justo por encima de la superficie, y a atacar por sorpresa siempre que sea posible. El número mínimo de helicópteros desplegados para una emboscada es de tres. Una vez en posición de emboscada, los helicópteros observarán el avance de los tanques y seleccionarán sus blancos. Para lanzar sus misiles, el helicóptero debe abandonar su posición oculta, ya sea aumentando su altitud o realizando una maniobra lateral para proporcionar a los misiles un campo abierto de tiro. Entonces el helicóptero puede volver a situarse en su antigua posición protegida, justo con la visión necesaria para seguir la trayectoria del misil.

El Modelo de Helicóptero Armado Antitanque presentado en la Figura 4.4.1 está tomado de un modelo de misión múltiple de supervivencia/

AUN CUANDO EL NÚMERO DE TANQUES DE LOS ESTADOS UNIDOS ERA MENOR QUE EL DE TANQUES DE IRAK DURANTE LA GUERRA DEL GOLFO, LA MOVILIDAD DE LAS DIVISIONES ACORAZADAS AMERICANAS LES PERMITIÓ CONCENTRAR SUS FUERZAS Y CON EL APOYO DE SUS HELICÓPTEROS ANTI-TANQUE, INVADIERON CON FACILIDAD LAS POSICIONES IRAQUIES. CONSIDERE EL SIGUIENTE MODELO DE UN BATALLA TÍPICA:

$$L \ \$T.K = \$T.J - (DT) (\$TL.JK)$$

$$N \ \$T = \$TN$$

NOTE $\$T$ - U.S. TANQUES USA (TANQUES)

$$C \ \$TN = 500$$

$$R \ \$TL.KL = CLIP (EIT * IT.K, 0, IT.K, 0)$$

NOTE $\$TL$ - PERDIDAS DE TANQUES USA (TANQUES/DIA)

$$C \ EIT = 0.2$$

NOTE EIT - EFECTIVIDAD DE TANQUES IRAQUIES (TANQUES/TANQUE-DIA)

$$L \ IT.K = IT.J - (DT) (ITL.JK)$$

$$N \ IT = ITN$$

NOTE IT - TANQUES IRAQUIES (TANQUES)

$$C \ ITN = 300$$

$$R \ ITL.KL = CLIP (E\$T * \$T.K + E\$H * \$H.K, 0, \$T.K + \$H.K, 0)$$

NOTE ITL - PERDIDAS DE TANQUES IRAQUIES (TANQUES/DIA)

$$C \ E\$T = 0.4$$

NOTE $E\$T$ - EFECTIVIDAD DE TANQUES USA (TANQUES/TANQUE-DIA)

$$C \ E\$H = 0.8$$

NOTE $E\$H$ - EFECTIVIDAD DE HELICOPTEROS USA (TANQUES/HELICOPTERO-DIA)

$$L \ \$H.K = \$H.J - (DT) (\$HL.JK)$$

$$N \ \$H = \$HN$$

NOTE $\$H$ - HELICOPTEROS USA (HELICOPTEROS)

$$C \ \$HN = 100$$

$$R \ \$HL.KL = CLIP (EITVH * IT.K, 0, IT.K, 0)$$

NOTE $\$HL$ - PERDIDAS DE HELICOPTEROS U.S.A. (HELICOPTEROS/DIA)

$$C \ EITVH = 0.1$$

NOTE $EITVH$ - EFECTIVIDAD DE TANQUES IRAQUIES CONTRA HELICOPTEROS

NOTE (HELICOPTEROS/TANQUE-DIA)

BUSCAR EL N° DE TANQUES U.S.A. PERDIDOS (34) Y EL N° DE HELICOPTEROS U.S.A. PERDIDOS (17) EN LA DESTRUCCION DE LOS TANQUES IRAQUIES

Figura 4.4.1. - MODELO DE HELICÓPTERO ARMADO ANTI-TANQUE -

$$\begin{aligned}
 dIT_t/dt &= -ITL_t = -(EIT * IT_t) \\
 dIT_t/dt &= -ITL_t = -(EST * \$T_t + E\$H * \$H_t) \\
 d\$H_t/dt &= -\$HL_t = -(EITVH * IT_t) \\
 \frac{d^2 IT_t}{dt^2} &= -EST * \frac{d\$T_t}{dt} - E\$H * \frac{d\$H_t}{dt} = (EST * EIT + E\$H * EITVH)IT_t \\
 \therefore \omega &= EST * EIT + E\$H * EITVH = 0.4 * 0.2 + 0.8 * 0.1 = 0.4 \\
 IT_t &= C_1 e^{-\omega t} + C_2 e^{-\omega t} \\
 dIT_t/dt &= C_1 \omega e^{-\omega t} - C_2 \omega e^{-\omega t} = -(EST * \$T_t + E\$H * \$H_t) \\
 ITN &= C_1 + C_2 \\
 -(EST * \$TN + E\$H * \$HN)/\omega &= C_1 - C_2 \\
 C_1 &= \frac{ITN - (EST * \$TN + E\$H * \$HN)/\omega}{2} = \frac{300 - (0.4 * 500 + 0.8 * 100)/0.4}{2} = -200 \\
 C_2 &= (300 + 700)/2 = 500 \\
 IT_t &= -200 e^{0.4t} + 500 e^{-0.4t} = 0 \quad \text{CUANDO LOS IRAQUIES FUERON DERROTADOS} \\
 e^{0.8t} &= 2.5 \rightarrow 0.8t = \ln 2.5 \rightarrow t = 1.24 * 0.916 = 1.15 \text{ DIAS} \\
 C_1 * 0.4 * e^{\omega t} - C_2 * 0.4 * e^{-\omega t} &= -(0.4\$T_t + 0.8\$H_t) \\
 \$T_t + 2\$H_t &= -C_1 e^{0.4t} + C_2 e^{-0.4t} = 200 e^{0.46} + 500 e^{-0.46} = 632.4 \\
 \frac{(\$TN - \$T_t)}{\$HN - \$H_t} &= \frac{EITH}{EITVH} = \frac{0.2}{0.1} = 2 \rightarrow \$T_t - 2\$H_t = 300 \\
 \text{con } 2\$T_t &= 932.4 \text{ y } \$T = 466.2 \text{ y } \$H_t = 83.1 \\
 \therefore \$TN - \$T_t &= 33.8 \\
 \$HN - \$H_t &= 16.9 \\
 \acute{o} \\
 d\$T_t/dt &= -EIT * IT_t = 40 e^{0.4t} - 100 e^{-0.4t} \\
 \$T_t &= 100 e^{0.4t} + 250 e^{-0.4t} + C_t \\
 \text{Ent } t = 0, C_t &= 150 \rightarrow \therefore \$T_t = 100 e^{0.4t} + 250 e^{-0.4t} + 150 \\
 \text{Ent } t = 1.15, \$T_t &= 466.2 \text{ y } \$TN - \$T_t = 33.8 \\
 d\$H_t/dt &= -EITVH * IT_t = 20 e^{0.4t} - 50 e^{-0.4t} \\
 \$H_t &= 50 e^{0.4t} + 125 e^{-0.4t} + C_H \\
 \text{Ent } t = 0, C_H &= -75 \therefore \$H_t = 50 e^{0.4t} + 125 e^{-0.4t} - 75 \\
 \text{Ent } t = 1.15, \$H_t &= 83.1 \text{ y } \$HN - \$H_t = 16.9
 \end{aligned}$$

Figura 4.4.1. - MODELO DE HELICÓPTERO ARMADO ANTI-TANQUE (Continuación) -

efecto mortífero, y ha sido simplificado para ilustrar la interdicción de objetivos para el primer caso especial del modelo general de atrición [28]. La medida de eficacia para este ejemplo es Tanques Destruídos por Helicóptero Perdido. El segundo ejemplo es otra aplicación del Caso 1, pero en ésta no se considera la interdicción de objetivos. Se ha tomado de un *Modelo de Defensa Aérea de Portaaviones* desarrollado por el Centro de Análisis Navales de los Estados Unidos [29].

La Fuerza de Combate de Portaaviones de la Armada de los Estados Unidos representa la aplicación más flexible de la potencia aérea con su capacidad de operar en cualquier parte del mundo, junto con una capacidad de ataque impresionante. El otro lado de la moneda es que se convierten en objetivos prioritarios para un enemigo. Equipados con la *munición y el combustible* para suministrar a su grupo aéreo típico de 86 aviones, un portaaviones es más vulnerable al ataque por armas convencionales que un aeródromo y requiere, por tanto, defensas efectivas. Por otra parte, para llevar a cabo las misiones asignadas, necesitan un complemento importante de aviones de ataque que a su vez requieren protección en el curso del desarrollo de sus misiones. De los 86 aviones, 16 están dedicados a operaciones de guerra antisubmarina, 34 a misiones de ataque, mientras que sólo dos escuadrones de 12 aviones cada uno tienen la responsabilidad de defender el portaaviones de los ataques aéreos, así como proporcionar cobertura aérea de caza para los aviones de ataque. Los 24 aviones de defensa se aumentan por 12 «multiplicadores de fuerza» que consisten en cuatro aviones de guerra electrónica (EA-6B Prowler) para contramedidas electrónicas, cuatro aviones de búsqueda (E-2C Hawkeye), y cuatro aviones cisterna (KA-6D) para el suministro en vuelo. Las dos funciones principales de los cazas del portaaviones se centran en la *defensa aérea*, en la que el caza opera como un interceptor, y en la escolta, en la que el caza asume un papel de superioridad aérea. Puesto que estas dos funciones tienen exigencias opuestas, tanto aerodinámica como tácticamente y en lo relativo al armamento, se pueden usar dos tipos de avión, o bien el caza de portaaviones de misión dual debe representar un compromiso. En la actualidad el papel de

defensa aérea está desempeñado por el Grumman F-14 «Tomcat» y el papel de caza de escolta por el McDonnell Douglas F/A-18 «Hornet».

En un principio las tecnologías Phoenix AWG-9 y AIM-54 estaban destinadas a armar el caza del portaaviones (caza de ala variable F-111B de General Dynamics), pero cuando el proyecto fracasó se aplicaron al F-14, que fue concebido como un caza definido de superioridad aérea lo bastante grande para llevar cuatro misiles Phoenix. Preocupados por lo que parecía ser el alto coste del F-14, se desarrolló el F/A-18. Las necesidades de superioridad aérea naval para el año 2000 serán satisfechas por un Caza Táctico Avanzado de la Armada, NATF, para sustituir al F-14 y para ser usado junto con un F/A-18 mejorado (F-18+), así como por un avión especializado, modernizado o nuevo, en la dirección de combates (AEW), medidas contraelectrónicas y suministro aéreo de combustible.

La vitalidad de la Fuerza de Combate de Portaaviones, **CBF**, depende de un sistema complejo de defensa que puede considerarse en dos fases: el «Combate Aéreo Exterior», **OAB**, y la «Zona de Defensa Interior», **IDZ**. Consideremos un elemento crítico del **OAB**: la interceptación por NATFs de bombarderos enemigos con base en tierra armados con misiles de crucero (véase el Modelo «NATF contra bombarderos», Figura 4.4.2). Además del tratamiento analítico usual de los modelos matemáticos desarrollados en esta monografía, en la Figura 4.4.3 se presenta un nomograma de la solución del modelo.

4.5 Supresión de amenazas por medio de fuego dirigido

Los modelos descritos en la Sección anterior son limitados, en el sentido de que no se permite una estrategia para reducir las pérdidas de un lado destruyendo las fuerzas del otro. No hay oportunidad de realizar una comparación supervivencia/efecto mortífero. En su sentido más puro, los modelos de supresión de

L $EB.K = EB.J - (DT) (ARB.JK)$
 N $EB = EBN$
 NOTE EB - BOMBARDEROS ENEMIGOS (AVIONES)
 C $EBN = 10$
 NOTE EBN - NUMERO INICIAL DE BOMBARDEROS ENEMIGOS (AVIONES)
 R $ARB.KL = EB.K * AEB * SREB * (1 - SSEB)$
 NOTE ARB - INDICE DE ATRICION DE BOMBARDEROS (AVIONES POR DIA)
 C $SSEB = 0.8$
 NOTE SSEB - INDICE DE SUPERVIVENCIA DE BOMBARDEROS ENEMIGOS POR MISION (PROBABILIDAD)
 A $CNCMS.K = CNCML.K * (1 - PLCMDN)$
 NOTE CNCMS - NUMERO ACUMULATIVO DE MISILES DE CRUCERO SUPERVIVIENTES (MISILES)
 C $PLCMDN = 0.4$
 NOTE PLCMDN - PROBABILIDAD DE QUE MISIL DE CRUCERO LANZADO SEA DESTRUIDO POR CAZA TACTICO
 NOTE NAVAL AVANZADO (NATF) (ADIMENSIONAL)
 A $CNCML.K = CNCMDB.K * PCML$
 NOTE CNCML - NUMERO ACUMULATIVO DE MISILES DE CRUCERO LANZADOS (MISILES)
 L $CNCMDB.K = CNCMDB.J + (DT) (DRCMB.JK)$
 N $CNCMDB = 0$
 NOTE CNCMDB - NUMERO ACUMULATIVO DE MISILES DE CRUCERO LANZADOS EN LA BATALLA AEREA
 NOTE EXTERIOR POR LOS BOMBARDEROS (MISILES)
 R $DRCMB.KL = EB.K * AEB * SREB * ANMPB$
 NOTE DRCMB - INDICE DE LANZAMIENTO DE MISILES DE CRUCERO POR BOMBARDEROS (MISILES/DIA)
 C $AEB = 0.5$
 NOTE AEB - DISPONIBILIDAD DE BOMBARDEROS ENEMIGOS (ADIMENSIONAL)
 C $SREB = 2$
 NOTE SREB - INDICE DE MISIONES DE BOMBARDEROS ENEMIGOS (MISIONES/DIA)
 C $ANMPB = 2$
 NOTE ANMPB - NUMERO MEDIO DE MISILES POR BOMBARDERO (MISILES POR AVION)
 N $PCML = 1 - SLVB * FBDBL$
 NOTE PCML - PROBABILIDAD DE LANZAMIENTO DE MISILES DE CRUCERO (ADIMENSIONAL)
 C $FBDBL = 0.5$
 NOTE FBDBL - FRACCION DE BOMBARDEROS DESTRUIDOS ANTES DEL LANZAMIENTO (ADIMENSIONAL)
 A $CMEIDZ.K = PCGIDZ * CNCMS.K$
 NOTE CMEIDZ - MISILES DE CRUCERO QUE ENTRAN EN LA ZONA DE DEFENSA INTERIOR (MISILES)
 C $PCGIDZ = 0.7$
 NOTE PCGIDZ - PROBABILIDAD DE QUE MISILES DE CRUCERO SEAN DIRIGIDOS EN LA ZONA DE DEFENSA
 NOTE INTERIOR (ADIMENSIONAL)
 L $EBD.K = EBD.J + (DT) (ARB.JK)$
 N $EBD = ZERO$
 C $ZERO = 0.0001$
 NOTE EBD - BOMBARDEROS ENEMIGOS DESTRUIDOS (AVIONES)
 C $SLVB = 0.2$
 NOTE SLVB - INDICE DE DESTRUCCION POR MISION DE CAZA TACTICO NAVAL AVANZADO EN COMPARACION
 NOTE CON BOMBARDEROS (PROB/MISION)
 A $FBD.K = EBD.K / EBN$
 NOTE FBD - FRACCION DE BOMBARDEROS DESTRUIDOS (ADIMENSIONAL)

Figura 4.4.2. - MODELO DE CAZA TÁCTICO NAVAL AVANZADO (NAFT)
VERSUS BOMBARDEROS -

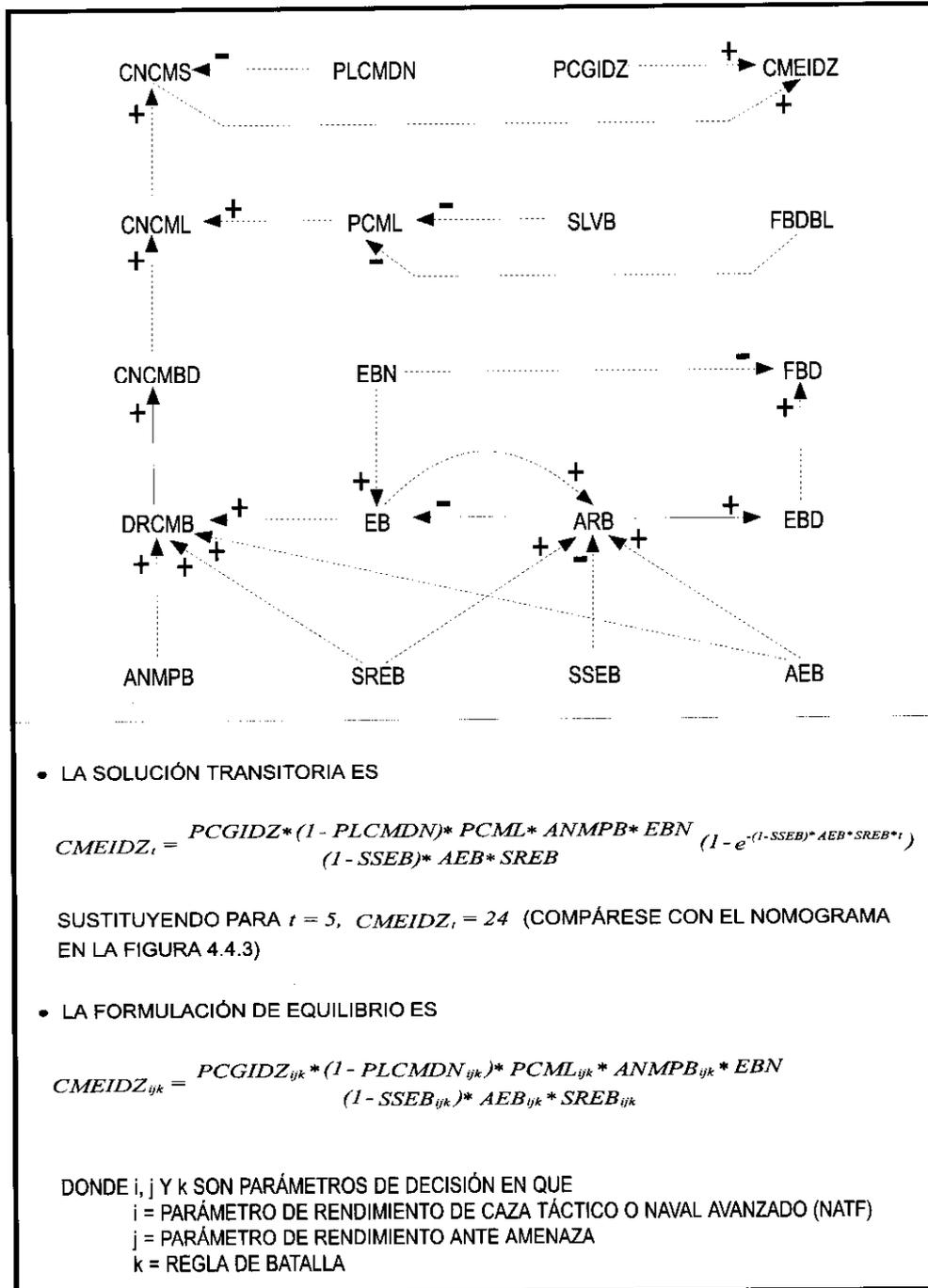


Figura 4.4.2. - MODELO DE CAZA TÁCTICO NAVAL AVANZADO (NAFT) VERSUS BOMBARDEROS (Continuación) -

amenazas muestran imágenes gemelas de los adversarios, ya que están equilibrados. Este concepto de «equilibrio» tiene implicaciones profundas. De hecho el equilibrio de fuerzas entre el este y el oeste, entre el Pacto de Varsovia y la OTAN, fue uno de los temas más críticos de nuestro tiempo. Durante décadas, desde los años 50 hasta los 90, cuando se disolvió el Pacto de Varsovia, el estado del equilibrio de fuerzas entre el Este y el Oeste fue un determinante fundamental de la estabilidad internacional. Este ejemplo pone de manifiesto el papel vital de las percepciones precisas sobre las relaciones de fuerza existentes.

Para ilustrar este segundo caso del modelo general de atrición, hemos elegido el equilibrio de las fuerzas aéreas. Las misiones de las fuerzas aéreas de la OTAN y del Pacto de Varsovia eran las mismas: la interdicción del campo de batalla descrito en la Sección 4.4, vigilancia, interdicción de suministros, bombardeo de largo alcance, transporte, y la última tarea, supresión de amenazas, es obstaculizar al enemigo para que no pueda llevar a cabo todas las demás misiones. Esta última misión es responsabilidad del avión de superioridad aérea o de caza. La expresión «combate aéreo» conjura una visión de dos cazas opuestos de alto rendimiento que maniobran y se deslizan sobre el fondo de un cielo azul claro en medio del estruendo de los post-quemadores, empeñados en un combate mortal.

El Modelo de Superioridad Aérea descrito en la Figura 4.5.1, aunque sencillo, contiene los elementos básicos (inventario, supervivencia y efecto mortífero) necesarios para tomar decisiones ponderadas. En el modelo, el inventario se consigue a través de las adquisiciones de material. Es importante recordar que cualquier debate sobre la defensa se centra no en la producción en tiempo de guerra, sino en los elementos existentes (inputs) en tiempos de paz: inventarios, preparación o disponibilidad, persistencia (llevada a cabo por el índice de misiones) y supervivencia (lograda por medio de la reducción de la susceptibilidad/vulnerabilidad). El modelo

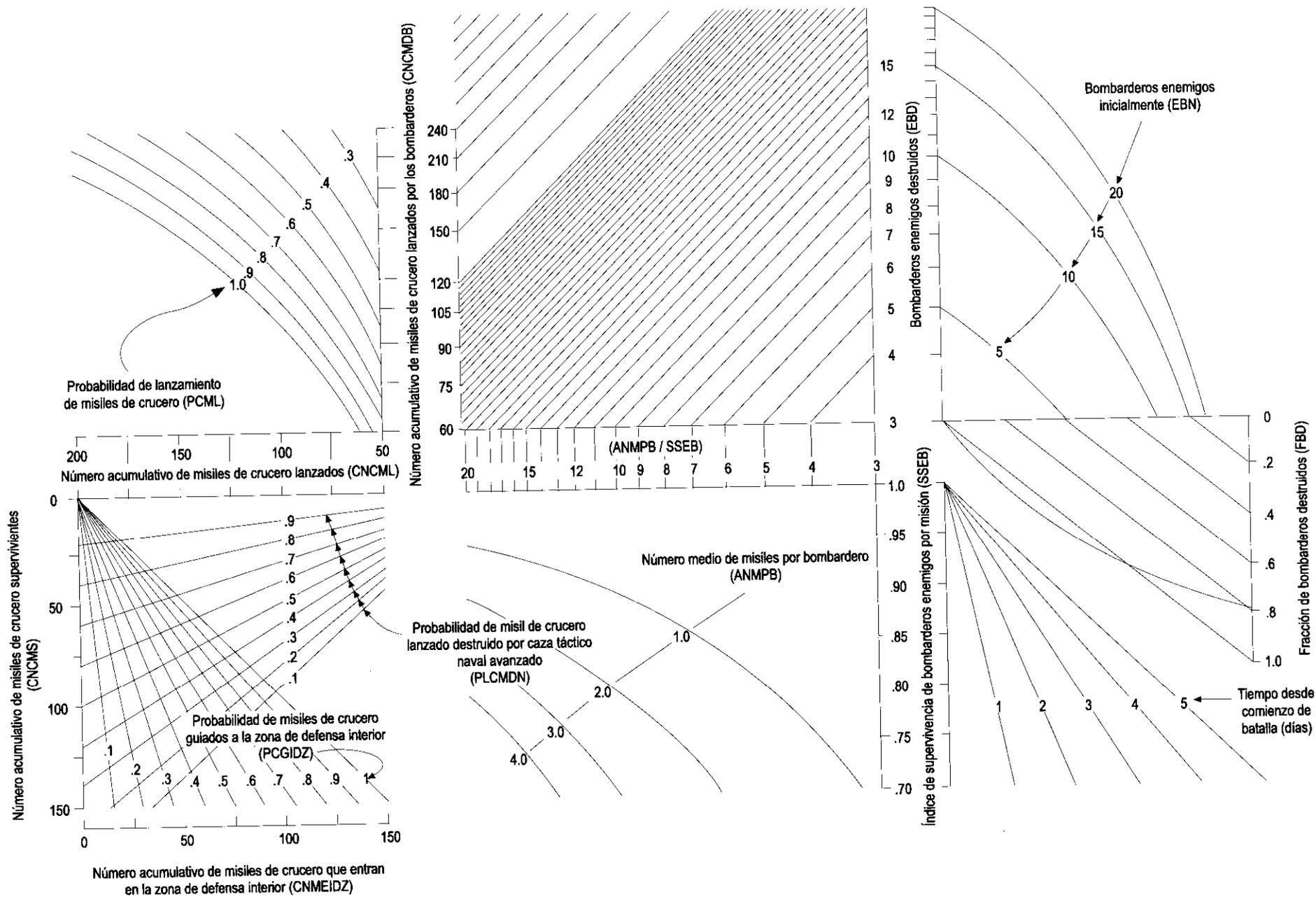


Figura 4.4.3 - GRÁFICO PARA CAZA TÁCTICO NAVAL AVANZADO VERSUS BOMBARDEROS -

refleja las teorías empleadas por los dos bandos con respecto a las relaciones calidad-cantidad. Por ejemplo, la OTAN durante muchos años ha favorecido la calidad por encima de la cantidad. Esto es adecuado siempre que el desequilibrio numérico no sea excesivo. Un ratio de intercambio (destrucciones divididas por las pérdidas) que sea inferior al ratio de inventarios es suicida. El ratio de intercambio relativo definido en el Modelo es la medida adecuada de la eficacia.

A veces el aspecto de la «imagen gemela» de un modelo de atrición de dos lados es confuso. Consideremos el Modelo de Defensa del Portaaviones mostrado en la Figura 4.5.2. Al final de la Guerra Fría, la OTAN tenía 20 portaaviones, mientras que el Pacto de Varsovia tenía solamente dos pequeños portaaviones de la clase Kiev. Durante décadas, los Soviéticos ridiculizaron a los portaaviones en una guerra futura como anticuados, pero hacia 1985 estaban planeando la construcción de varios de ellos más grandes que los de la clase Kiev. La respuesta original del Pacto de Varsovia a la capacidad de portaaviones de la OTAN fue el misil de crucero lanzado desde el aire, un sistema de armamento relativamente pequeño, difícil de detectar y renovable, lanzado por aviones soviéticos con base en tierra. Los Estados Unidos contrarrestaron esto con el F-14 «Tomcat», un caza basado en portaaviones y armado con misiles aire-aire capaces de lograr una defensa tanto contra los misiles de crucero como contra los aviones que los lanzan. El modelo de atrición de la Figura 4.5.2 tiene como objetivo ilustrar la dinámica de la interacción, simplificada en el sentido de que las pérdidas del F-14 se atribuyen únicamente a daños en los portaaviones, tanto directamente (cada impacto en el portaaviones destruirá algunos de los F-14 presentes) como indirectamente (cada impacto en el portaaviones creará dificultades para el aterrizaje de los F-14 y causará algunas pérdidas). Puesto que los bombarderos soviéticos de ataque con los misiles de crucero no disponen de misiles aire-aire, su capacidad para destruir a los F-14 que los intercepten es insignificante.

```

NOTE *****
NOTE ***** ECUACIONES DE SISTEMA *****
NOTE *****
L  $$K = $$J + (DT) (PR$$JK - AR$$JK)
N  $$ = A * DPB
NOTE  $$ - AVIONES U.S.A. (AVIONES)
C  DPB = 1000
NOTE  DPB - DURACION DEL PROGRAMA DE ARMAMENTO EN TIEMPOS DE PAZ (DIA)
R  PR$$KL = A
NOTE  PR$$ - INDICE DE APROVISIONAMIENTO DE AVIONES U.S.A. (AVIONES/DIA)
R  AR$$KL = CLIP (B * XX.K, 0, XX.K, 0)
NOTE  AR$$ - INDICE DE DESGASTE DE AVIONES U.S.A (AVIONES/DIA)
N  B = SRXX * AVXX * (1 - MSS$)
NOTE  B - PARAMETRO DE EFECTIVIDAD PARA AVIONES U.R.S.S. (FRACCION/DIA)
C  SRXX = 2
NOTE  SRXX - INDICE DE MISIONES PARA AVIONES U.R.S.S. (FRACCION/DIA)
C  AVXX = 0.5
NOTE  AVXX - DISPONIBILIDAD DE AVIONES U.R.S.S. (PROB)
C  MSS$ = 0.98
NOTE  MSS$ - SUPERVIVENCIA DE AVIONES U.S.A. POR MISION (PROB)
L  XX.K = XX.J + (DT) (PRXX.JK - ARXX.JK)
N  XX = P * DPB
NOTE  XX - AVIONES U.R.S.S. (AVIONES)
R  PRXX.KL = P
NOTE  PRXX - INDICE DE APROVISIONAMIENTO DE AVIONES U.R.S.S. (AVIONES/DIA)
R  ARXX.KL = CLIP (C * $$K, 0, $$K, 0)
NOTE  ARXX - INDICE DE DESGASTE DE AVIONES U.R.S.S. (AVIONES/DIA)
N  C = SR$$ * AV$$ * (1 - MSXX)
NOTE  C - PARAMETRO DE EFECTIVIDAD PARA AVIONES U.S.A (FRACCION/DIA)
C  SR$$ = 2
NOTE  SRXX - INDICE DE MISIONES PARA AVIONES U.S.A. (FRACCION/DIA)
C  AV$$ = 0.5
NOTE  AV$$ - DISPONIBILIDAD DE AVIONES U.S.A. (PROB)
C  MSXX = 0.92
NOTE  MSXX - SUPERVIVENCIA DE AVIONES U.R.S.S. POR MISION (PROB)
C  A = 1.0
C  P = 2.0
NOTE *****
NOTE ***** INSTRUCCIONES DE CONTROL *****
NOTE *****
SPEC  DT = 0.25 / LENGTH = 100 / PLTPER = 5 / PRTPER = 5
PLOT  $$ = $, XX = X (0,2000)
PRINT $$, XX, L1, L2
NOTE *****
NOTE ***** SALIDA DE ORDENADOR *****
NOTE *****

```

Figura 4.5.1. - MODELO DE SUPERIORIDAD AÉREA -

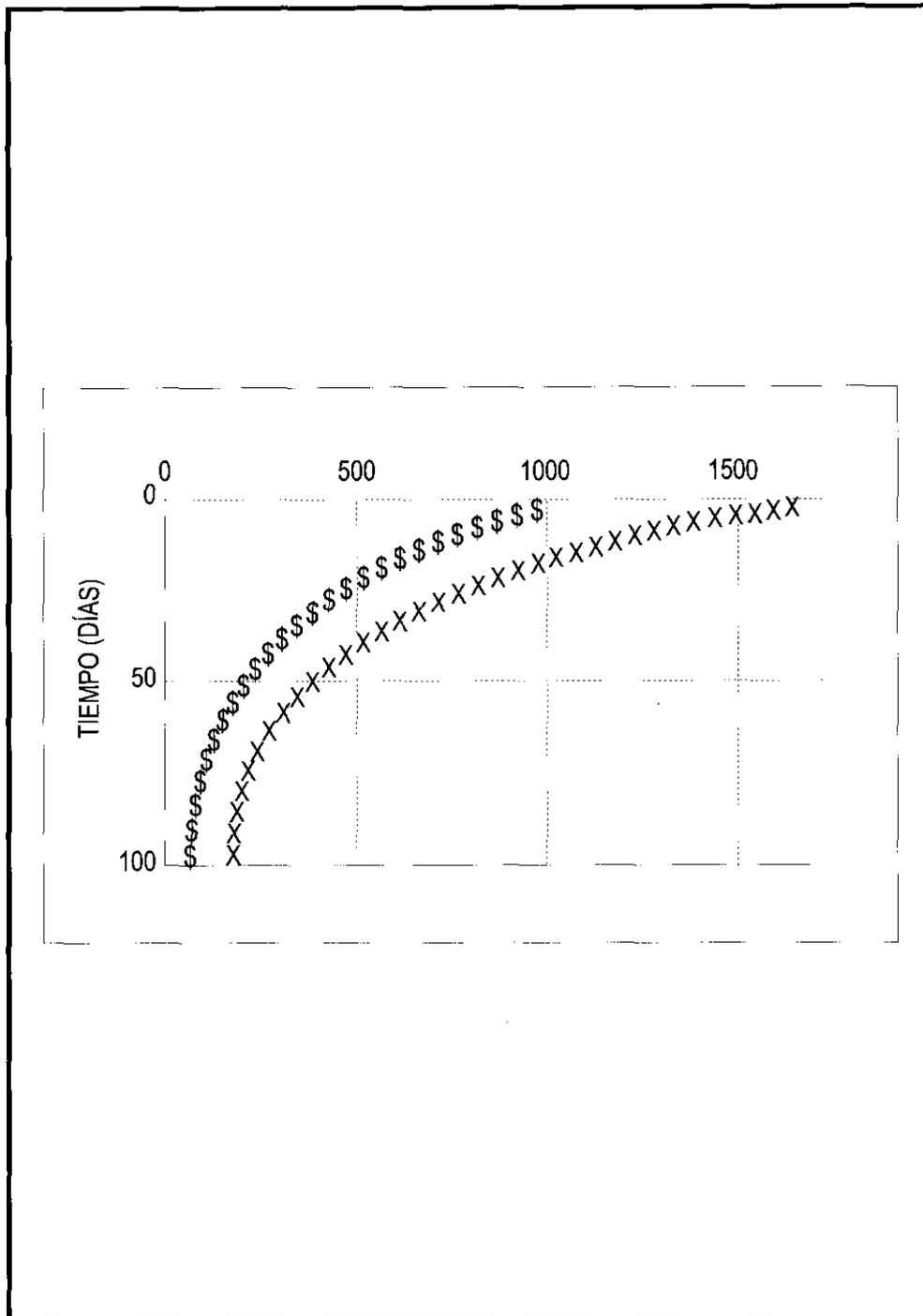


Figura 4.5.1. - MODELO DE SUPERIORIDAD AÉREA (Continuación) -

```

NOTE *****
NOTE ***** ECUACIONES DE SISTEMA *****
NOTE *****
L TF.K = MAX (0, TF.J + (DT) (PRTF.JK - ARTF.JK)) **
NOTE      TF - CAZA "TOMCAT" F-14 (AVION) **
N TF = TFN **
N TFN = A * DPB **
C DPB = 1800  DPB - DURACION DEL PROGRAMA DE ARMAMENTO EN TIEMPOS DE PAZ (DIAS) **
R PRTF.KL = A  PRTF - INDICE DE PRODUCCION DE F-14 (AVIONES/DIA) **
R ARTF.KL = HRAC.K * (DLPH + ILPH)  ARTF - INDICE DE DESGASTE F-14 (AVIONES/DIA) **
C DLPH = 3  DLPH - BAJA DIRECTA POR IMPACTO (AVIONES/IMPACTO) **
C ILPH = 1  BAJA INDIRECTA POR IMPACTO (AVIONES/IMPACTO) **
A HRAC.K = LRCM.K * PCMS * PCMH  HRAC - INDICE DE IMPACTOS EN PORTAVIONES (IMPACTOS/DIA) **
C PCMS = 0.5  PCMS - PROBABILIDAD DE SUPERVIVENCIA DE MISILES DE CRUCERO (PROB) **
N PCMH = 0.005  PCMH - PROBABILIDAD DE QUE MISIL DE CRUCERO IMPACTE PORTAVIONES (PROB) **
A LRCM.K = SRABN * AAB * AB.K * NMPB * PCML **
NOTE      LRCM - INDICE DE LANZAMIENTO DE MISIL DE CRUCERO (MISILES/DIA) **
C SRABN = 2  SRABN - INDICE DE MISIONES DE BOMBARDEROS DE ATAQUE NORMAL (FRACCION/DIA) **
C AAB = 0.5  AAB - DESPONIBILIDAD DE BOMBARDEROS DE ATAQUE (PROB) **
C NMPB = 2  NMPB - Nº MISILES POR BOMBARDERO (MISILES/AVION) **
C PCML = 0.5  PCML - PROBABILIDAD DE LANZAMIENTO DE MISILES DE CRUCERO (PROB) **
L AB.K = MAX (0, AB.J + (DT) (PRAB.JK - ARAB.JK)) **
NOTE      AB - BOMBARDERO DE ATAQUE **
N AB = ABN **
N ABN = P * DPB **
R PRAB.KL = P  PRAB - INDICE DE PRODUCCION DE BOMBARDEROS DE ATAQUE (AVIONES/DIA) **
R ARAB.KL = SRTFN * ATFN * (1 - MSAB) * TF.K **
NOTE      ARAB - INDICE DE DESGASTE DE BOMBARDEROS DE ATAQUE (AVIONES/DIA) **
C SRTFN = 2  SRTFN - INDICE NORMAL DE MISIONES DE F-14 (FRACCION/DIA) **
C ATFN = 0.5  ATFN - DISPONIBILIDAD NORMAL F-14 (PROB) **
C MSAB = 0.91  MSAB - SUPERVIVENCIA POR MISION DE BOMBARDEROS DE ATAQUE (PROB) **
C A = 0.4 **
C P = 0.6 **
NOTE *****
NOTE ***** INSTRUCCIONES DE CONTROL *****
NOTE *****
    
```

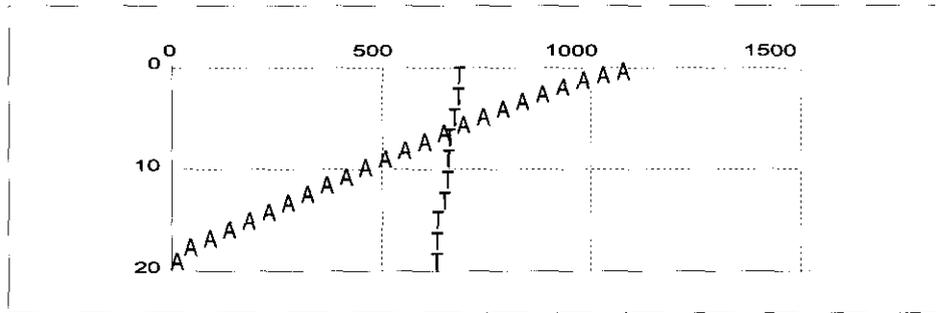


Figura 4.5.2. - MODELO DE DEFENSA DE PORTAVIONES -

Las cuestiones siguientes son relevantes en el desarrollo y análisis del Modelo de Defensa de Portaaviones:

- (1) ¿Qué lado gana?
- (2) ¿Cuántos aviones pierden los ganadores para derrotar a los perdedores?
- (3) ¿Cuántos aviones tiene cada lado un mes después del comienzo de la guerra?
- (4) ¿Cuál es el valor crítico de **PCMH**, Probabilidad de Impacto de un Misil de Crucero?

La cuarta pregunta es intrigante. Aumenta el poder de los modelos para lograr percepciones en problemas complejos para los que no existe ningún precedente histórico. Puesto que un bombardero de ataque soviético nunca ha lanzado un misil de crucero contra un portaaviones americano, ¿qué valor debe usarse para el parámetro **PCMH**? La respuesta consta de dos partes: (1) buscar el precedente histórico más próximo; y (2) estimar el valor de **PCMH** a partir de nuestra tecnología propia de misiles de crucero. Con respecto a la primera parte, la tasa de éxitos de los kamikazes japoneses durante la Segunda Guerra Mundial resulta instructiva. Los pilotos japoneses estaban entrenados para hacer ataques suicidas estrellando aviones cargados de explosivos contra los buques de guerra americanos, es decir, misiles de crucero operados manualmente.

4.6 Fuego de área

El modelo de atrición de Lanchester para el fuego de área o no dirigido (Caso 4) supone que la probabilidad de que un disparo contra un área, en lugar de contra un objetivo preciso, alcance un objetivo es proporcional a la densidad de objetivos en el área. De este modo, para un duelo de artillería entre fuerzas rojas y azules, tenemos el Modelo de Fuego de Artillería No Dirigido de la Figura 4.6.1.

A veces se da una situación en la que lo apropiado es una mezcla de ambos modelos. En la Batalla de El Alamo en 1836, los tejanos apuntaban a una multiplicidad de blancos mejicanos, y al usar rifles de precisión a gran distancia (300 metros), parecería adecuado que utilizaran el modelo de fuego dirigido para causar bajas entre los mejicanos. Puesto que los mejicanos usaban mosquetes menos precisos (100 metros) y disparaban contra un enemigo fortificado y oculto, el modelo de fuego no dirigido sería el apropiado para lograr bajas tejanas. Se sabe que el General Santa Ana atacó El Alamo con 3000 hombres, de los cuales perecieron 1500. El Alamo tenía 188 defensores y todos murieron en la defensa [30].

Puesto que los modelos de atrición se desarrollaron para estudiar posibles combates futuros, los valores numéricos de los coeficientes de combate son realmente difíciles de medir, cuando no imposibles. No obstante, es instructivo encontrar valores apropiados usando los datos de la misma batalla. Una vez que estos valores se establecen para una batalla, son conocidos para todos los otros combates en los que se lucha en condiciones análogas. Consideremos el Modelo de la Batalla de El Alamo. Con base a las hipótesis de fuego dirigido y sin dirigir, las ecuaciones diferenciales para los tejanos, $\$$, y para los mejicanos, X , son:

$$\frac{d\$}{dt} = -(U)(X)(\$) \quad (4.6.1)$$

y

$$\frac{dX}{dt} = -(C)(\$) \quad (4.6.2)$$

Dividiendo 4.6.1 por 4.6.2, se obtiene

$$\frac{d\$}{dX} = \frac{U}{C} X \quad (4.6.3)$$

Separando las variables e integrando, se obtiene la ecuación de paridad

EL MODELO DE DESGASTE DE LANCHESTER DE FUEGO NO DIRIGIDO ASUME LA PROBABILIDAD DE QUE UN TIRO DIRIGIDO A UNA ZONA Y NO A UN BLANCO, DA EN UN BLANCO EN PROPORCIÓN A LA DENSIDAD DE OBJETIVOS EN LA ZONA. POR TANTO, PARA UN DUELO DE ARTILLERÍA ENTRE LAS FUERZAS ROJAS Y AZULES EXISTE EL MODELO SIGUIENTE:

NOTE
 NOTE ***** MODELO DE FUEGO DE ARTILLERIA NO DIRIGIDO *****
 NOTE
 NOTE
 L B.K = B.J - (DT) (BK.JK)
 N B = BN
 NOTE B - ARTILLERIA AZUL (UNIDADES)
 C BN = 1600
 NOTE BN - ARTILLERIA INICIAL AZUL (UNIDADES)
 R BK.KL = PHOB.K * SPRPD * R.K
 NOTE BK - BAJAS AZULES (UNIDADES/DIA)
 C SPRPD = 750
 NOTE SPRPD - DISPAROS POR ROJO POR DIA (DISPAROS/UNIDAD - DIA)
 A PHOB.K = IARP * DB.K
 NOTE PHOB - PROBABILIDAD DE IMPACTO EN AZUL (FRACCION UNIDAD/DISPARO)
 C IARP = 0.04
 NOTE IARP - ZONA DE IMPACTO DE PROYECTIL ROJO (ACRES/DISPARO)
 A DB.K = B.K/AB
 NOTE DB - DENSIDAD DE AZULES (UNIDADES/ACRE)
 C AB = 5E6
 NOTE AB - ZONA DE AZULES (ACRES)
 L R.K = R.J - (DT) (RK.JK)
 H R = RN
 NOTE R - ARTILLERIA ROJA (UNIDADES)
 C RN = 5000
 NOTE RH - ARTILLERIA INICIAL ROJA (UNIDADES)
 R RK.KL = PHOR.K * SPBPD * B.K
 NOTE RK - BAJAS ROJAS (UNIDADES/DIA)
 C SPBPD = 1200
 NOTE SPBPD - DISPAROS POR AZUL POR DIA (DISPAROS/UNIDAD - DIA)
 A PHOR.K = IABP * DR.K
 NOTE PHOR - PROBABILIDAD DE IMPACTO EN ROJO (FRACCION UNIDAD/DISPARO)
 C IABP = 0.06
 NOTE IABP - ZONA DE IMPACTO DE PROYECTIL AZUL (ACRES/DISPARO)
 A DR.K = R.K/AR
 NOTE DR - DENSIDAD DE ROJOS (UNIDADES/ACRE)
 C AR = 4E6
 NOTE AR - AREA DE ROJOS (ACRES)
 A KLR.K = (RN - R.K) / (BH - B.K + 1E - 5)
 NOTE KLR - RATIO DE MUERTOS A BAJAS (ADIMENSIONAL)

$$dB_t / dt = - BK_t - PHOB_t * SPRPD * R_t = - IARP * DB_t * SPRPD * R_t$$

$$dB_t / dt = - (IARP * SPRPD / AB) * B_t * R_t$$

$$dR_t / dt = - RK_t - PHOR_t * SPBPD * B_t = - IABP * DR_t * SPBPD * B_t$$

$$dR_t / dt = - (IABP * SPBPD / AR) * R_t * B_t$$

sea $C1 = IARP * SPRPD / AB$ y $C2 = IABP * SPBPD / AR$

$$\frac{dB_t}{dt} = C1 * B_t * R_t \quad \text{por tanto} \quad \frac{dB_t}{dt} = \frac{C1}{C2} \quad \text{luego} \quad C2 * B_t = C1 * R_t + C$$

$$\frac{dR_t}{dt} = C2 * R_t * B_t$$

En $t = 0, C = C2 * BN - C1 * RN$, por tanto $C2 * (B_t - BN) = C1 * (R_t - RN)$

$$(A) \quad KLR = \frac{RN - R_t}{BN - B_t} = \frac{C2}{C1} = \frac{0.06 * 1200 / 4E6}{0.04 * 750 / 5E6} = \frac{72 * 5E6}{30 * 4E6} \approx 3:1$$

$$(B) \quad \frac{RN - R_t / RN}{BN - B_t / BN} = \frac{RN - R_t}{BN - B_t} * \frac{BN}{RN} = \frac{3}{1} * \frac{1600}{5000} = 0.96 \therefore \frac{RN - R_t}{RN} < \frac{BN - B_t}{BN} \text{ ROJO GANA}$$

ó $C1 * RN > C2 * BN$ POR TANTO ROJO GANA

EFFECTIVIDAD UNIDAD ROJA * FUERZA ROJA > EFFECTIVIDAD UNIDAD AZUL * FUERZA AZUL

(C) Cuando $B_t = 0, R_t = RN - BN * (C2 / C1) = 5000 - 1600 * 3 = 200$

$$(D) \quad \frac{dB_t}{dt} = - C1 * B_t * [RN + \frac{C2}{C1} (B_t - BN)] = - C1 * B_t * RN - C2 * B_t (B_t - BN)$$

$$\frac{dB_t}{dt} = - B_t [C1 * RN + C2 (B_t - BN)]$$

$$\frac{dB_t}{dt} = B_t [C2 (BN - B_t) - C1 * RN] = B_t [(BN - B_t) - \frac{C1}{C2} RN] C2 = B_t [(BN - \frac{C1}{C2} RN) - B_t] C$$

$$\frac{dB_t}{dt} = B_t [(C / C2) - B_t] C2 = B_t [B - B_t] C2 \quad \text{donde} \quad B = C / C2 = BN - \frac{C1}{C2} RN$$

$$\int \frac{dB_t}{B_t * (B - B_t)} = \int C2 dt = \frac{1}{B} \left(\int \frac{dB_t}{B_t} + \frac{dB_t}{B - B_t} \right) \text{ así pues } \ln \frac{B_t}{B - B_t} \Big|_{BN}^{B_t} = B * C2 * t = C * t$$

$$\frac{B_t}{B - B_t} * \frac{BN}{B - BN} e^{Ct} \quad \text{por tanto} \quad \frac{B - B_t}{B_t} = \frac{B - BN}{BN} e^{-Ct}$$

$$B_t = \frac{B}{1 + \left(\frac{B}{BN} - 1 \right) e^{Ct}} = \frac{BN - (C1 / C2) RN}{1 + \frac{(BN - (C1 / C2) RN - 1) e^{-(C2 * BN - C1 * RN) t}}{BN}}$$

$$B_t = \frac{1600 - 1666.67}{1 + \left(\frac{-66.67}{1600} - 1 \right) e^{-(0.0288 - 0.03) 100}} = \frac{-66.67}{1 - 1.0417 e^{-0.12}} = \frac{-66.67}{1 - 1.175} = 382.0$$

$$R_t = RN + (C2 / C1) (B_t - BN) = 5000 - 3 (1600 - 382) = 5000 - 3654 = 1346$$

- (A) ENCUENTRE EL RATIO DE MUERTOS A BAJAS DEL LADO AZUL, KLR = _____
 (B) MARQUE EL LADO GANADOR. B (AZUL) O R (ROJO)
 (C) ENCUENTRE EL NUMERO QUE QUEDA EN EL LADO GANADOR CUANDO SE ANIQUILA EL LADO PERDEDOR _____
 (D) ¿CUÁNTOS TIENEN CADA LADO EN T = 100 DÍAS?
 $B_t =$ _____ $R_t =$ _____

Figura 4.6.1. - MODELO DE FUEGO DE ARTILLERÍA NO DIRIGIDO -

$$X_t^2 - X_0^2 = \frac{2C}{U} (\$_t - \$_0) \quad (4.6.4)$$

Sustituyendo $X_0 = 3000$, $X_t = 1500$, $\$_0 = 188$ y $\$_t = 0$, se obtiene el valor para el índice

$$C/U = 17952 \quad (4.6.5)$$

A partir de aquí podemos hallar $\* , el número de tejanos que hubieran sido necesarios para defender El Alamo contra el ejército atacante:

$$\frac{3000^2}{(2)(17952)} = 250 \quad (4.6.6)$$

Otra batalla que ha sido estudiada extensamente como un prototipo para calibrar los modelos de atrición es la batalla de Iwo Jima. 21500 japoneses defendieron la isla durante 28 días contra una fuerza invasora de 73000 americanos; 20500 japoneses y 7000 americanos perecieron. Brown [31] determinó los coeficientes **B** y **C** en un modelo de atrición de fuego dirigido (Caso 2), obteniendo unos valores **B** = 0,055 y **C** = 0,011, basándose en lo que llamó 53000 tropas americanas «efectivas» supervivientes una vez que los heridos se tuvieron en cuenta.

4.7 Paridad y pérdidas aceptables

Una formulación ligeramente diferente del modelo general de atrición presentado en la Sección 4.3 es la siguiente:

$$\frac{d\$_t}{dt} = -U(X_t)^{C1} (\$_t)^{C2} \quad (4.7.1)$$

y

$$\frac{dX_t}{dt} = -V(X_t)^{C3} (\$_t)^{C4} \quad (4.7.2)$$

Aplicando la forma del cociente de la regla de encadenamiento, se obtiene el índice instantáneo de bajas - intercambio:

$$\frac{d\$}{dX} = \frac{U}{V} (X_t)^{C1-C3} (\$_t)^{C2-C4} \quad (4.7.3)$$

$$\frac{d\$}{dX} = \frac{U(X_t)^{C1-C3}}{V(\$_t)^{C4-C2}} \quad (4.7.4)$$

Separando los valores e integrando, se obtiene

$$V \int_{\$_0}^{\$t} (\$_t)^{C4-C2} d \$_t = U \int_{X_0}^{X_t} (X_t)^{C1-C3} dX_t \quad (4.7.5)$$

la cual da la fórmula general de la ecuación de estado:

$$\frac{V}{C4-C2+1} (\$t^{C4-C2+1} - \$_0^{C4-C2+1}) = \frac{U}{C1-C3+1} (X_t^{C1-C3+1} - X_0^{C1-C3+1}) \quad (4.7.6)$$

La ecuación de estado o paridad para los casos especiales puede encontrarse sustituyendo los parámetros **C** por 0 ó 1. Para la interdicción de objetivos (Caso 1), **C1=C4=0** y **C2=C3=1**, con lo que se obtiene

$$V \ln \left(\frac{\$t}{\$_0} \right) = U \ln \left(\frac{X_t}{X_0} \right) \quad (4.7.7)$$

Para fuego dirigido (Caso 2), **C1=C4=1** y **C2=C3=0**, con lo que se obtiene la llamada ecuación de paridad de la ley cuadrática de Lanchester:

$$V(\$t^2 - \$_0^2) = U(X_t^2 - X_0^2) \quad (4.7.8)$$

Para fuego de área (Caso 4), **C1=C2=C3=C4=1**, con lo que se obtiene la ecuación de paridad de la ley lineal de Lanchester:

$$V(\$t - \$_0) = U(X_t - X_0) \quad (4.7.9)$$

La paridad se da cuando los dos lados tienen la misma efectividad y se llega a una condición de equilibrio; ningún lado gana o pierde. La Figura 4.7.1 muestra la relación entre los parámetros que

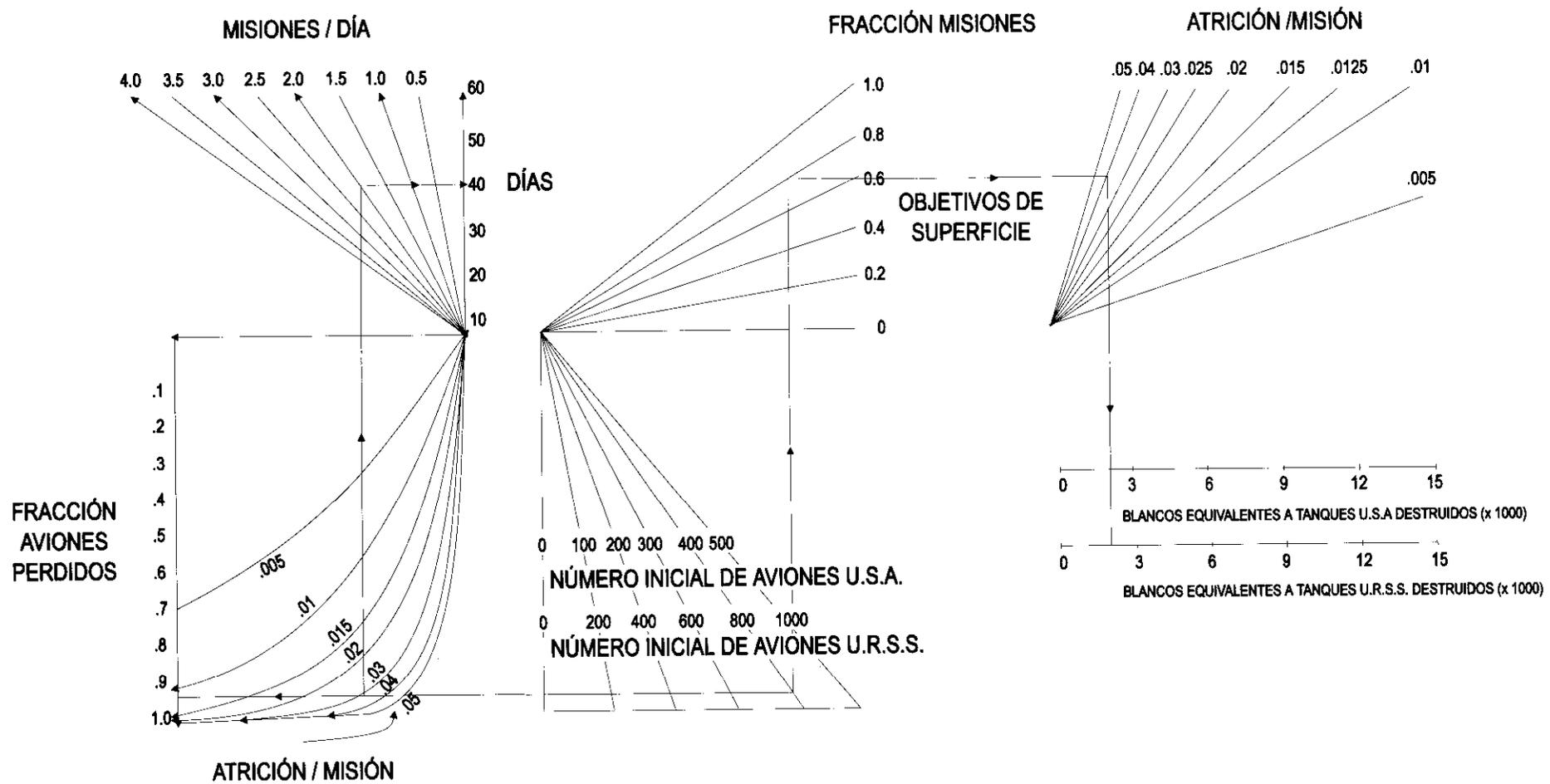


Figura 4.7.1 - RELACIONES DE EFECTIVIDAD DE AVIONES DE COMBATE -

ayudará a lograr una comprensión de la eficacia de las misiones de cada lado. El gráfico se usa solamente para la condición de equilibrio. Si la atrición por misión de ambos lados es la misma, la fracción de los aviones perdidos será la misma en cualquier momento.

El ejemplo tomado de la historia reciente mostrado en el gráfico se basa en el modelo siguiente, una aplicación del Caso 4, Figura 4.3.1:

$$\begin{aligned} d\$/dt &= -0.006 XX_t - 0.024 \$\$_t \\ dXX_t/dt &= -0.008 \$\$_t - 0.032 XX_t \end{aligned} \quad (4.7.10)$$

en donde **XX** designa el número de aviones de la Unión Soviética y **\$\$** designa el número de aviones de los Estados Unidos.

El número de aviones de la Unión Soviética es inicialmente el doble del de los Estados Unidos, y también se supone que los objetivos equivalentes de tanques soviéticos destruidos inicialmente es el doble que los de los Estados Unidos.

El gráfico muestra solamente la relación entre los parámetros y la sensibilidad de los mismos. No da información para el caso en que uno de los lados incremente su capacidad con objeto de romper el equilibrio del sistema. Lo que hace es proporcionar al lector una percepción del aspecto calidad-cantidad en la confrontación entre EE.UU. y la URSS para la misión combinada interdicción/supresión.

Es muy importante comprender que las ecuaciones de paridad desarrolladas anteriormente suponen que los dos lados están dispuestos a aceptar la misma proporción de pérdidas. Si éste no es el caso, entonces una fuerza menos numerosa y menos eficaz puede salir victoriosa a pesar de todo. En el escenario descrito en el Modelo de Atrición con Pérdidas Aceptables mostrado en la Figura 4.7.2, supongamos que la Armada rusa tiene la voluntad de luchar hasta que sus fuerzas se reduzcan al 20% de su tamaño original, mientras que la Armada americana se vería forzada a cesar hostilidades, debido a la opinión pública, cuando sus pérdidas

LOS MODELOS TRADICIONALES DE PARIDAD ASUMEN QUE AMBOS LADOS ESTÁN DISPUESTOS A SOPORTAR LA MISMA PROPORCIÓN DE PÉRDIDAS. SI ESTE NO FUERA EL CASO, UNA FUERZA DE OTRO MODO MENOS EFECTIVA PUEDE SALIR VICTORIOSA. EN EL ESCENARIO QUE SE VE A CONTINUACIÓN, SUPONEMOS QUE LA ARMADA SOVIÉTICA ESTÁ DISPUESTA A LUCHAR HASTA QUE SUS EFECTIVOS SE REDUZCAN AL 0,2 DE SU TAMAÑO INICIAL; PERO QUE LA MÁS PODEROSA ARMADA DE LOS ESTADOS UNIDOS SE VERÍA FORZADA A TERMINAR CON LAS HOSTILIDADES DEBIDO A LA OPINIÓN PÚBLICA CUANDO SUS PÉRDIDAS FUESEN EL 20 % DE SUS EFECTIVOS (CUANDO SU FUERZA LLEGASE AL 0,8 DE SU VALOR INICIAL).

NOTE *****

NOTE ***** MODELO DE ATRICIÓN DE PERDIDAS ACEPTABLES *****

NOTE *****

L $\$.K = \$.J - (DT) (A\$.JK)$

N $\$ = \$.N$

NOTE $\$$ - ARMADA U.S.A. (BARCOS)

C $\$.N = 500$

NOTE $\$.N$ - VALOR INICIAL ARMADA U.S.A. (BARCOS)

R $A\$.KL = CLIP (EX * X.K, 0, X.K, 0)$

NOTE $A\$$ - ATRICIÓN DE MARINA U.S.A. (BARCOS/DIA)

N $EX = P (1 - S\$)$

NOTE EX - EFECTIVIDAD DE BARCOS SOVIETICOS (PROBABILIDAD/DIA)

C $S\$ = 0.99$

NOTE $S\$$ - SUPERVIVENCIA DE BARCOS U.S.A. (PROBABILIDAD)

C $P = 2$

NOTE P - FRECUENCIA DE ENCUENTROS (ENCUENTROS /DIA)

L $X.K = X.J - (DT) (AX.JK)$

N $X = XN$

NOTE X - ARMADA U.R.S.S. (BARCOS)

C $XN = 600$

NOTE XN - VALOR INICIAL ARMADA U.R.S.S. (BARCOS)

R $AX.KL = CLIP (E\$ * X.K, 0, X.K, 0)$

NOTE AX - DESGASTE DE LA ARMADA U.R.S.S. (BARCOS/DIA)

N $E\$ = P (1 - SX)$

NOTE $E\$$ - EFECTIVIDAD DE BARCOS AMERICANOS (PROBABILIDAD/DIA)

C $SX = 0.96$

NOTE SX - SUPERVIVENCIA DE BARCOS U.R.S.S. (PROBABILIDAD)

A $KLR.K = (XN - X.K) / MAX (\$.N - \$.K, 0.0001)$

NOTE KLR - RATIO DE MUERTOS A BAJAS PARA U.S.A. (BARCOS/BARCO)

NOTE *****

(A) ¿QUÉ LADO GANA (NO ABANDONA PRIMERO)? _____

(B) ¿CUÁNDO TERMINA LA GUERRA? $T =$ _____

(C) ¿CUÁNTOS BARCOS TIENE CADA LADO AL FINAL DE LA GUERRA (EN TIEMPO T)?

$\$(t = T) =$ _____ $X(t = T) =$ _____

Figura 4.7.2. - MODELO DE ATRICIÓN DE PÉRDIDAS ACEPTABLES -

$$\begin{aligned}
 dS_t/dt &= -AS_t = -EX * X_t \quad \text{donde } EX = P(1 - SS) = 0.02 \\
 dX_t/dt &= -AX_t = -ES * S_t \quad ES = P(1 - SX) = 0.08 \\
 d^2 X_t/dt^2 &= -ES(dS_t/dt) = ES * EX * X_t = \omega^2 * X_t \quad \text{donde } \omega = EX * ES = 0.04 \\
 X_t &= C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t} \quad XN = C_1 + C_2 \\
 dX_t/dt &= C_1 \omega e^{\omega t} - C_2 \omega e^{-\omega t} = -ES * S_t \quad -ES * SN / \omega = C_1 - C_2 \\
 \therefore S_t &= -\frac{C_1 \omega}{ES} e^{\omega t} + \frac{C_2 \omega}{ES} e^{-\omega t} \quad C_1 = (XN - ES * SN / \omega) / 2 = -200 \\
 & \quad C_2 = (XN + ES * SN / \omega) / 2 = +800 \\
 S_t &= 100 e^{0.04t} + 400 e^{-0.04t}; \quad 400 = 100y + 400y^{-1} \quad \text{donde } y = e^{0.04t} \\
 \text{luego } &100y^2 - 400y + 400 = 0 \quad \ln y = 0.04t \\
 y &= \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{400 \pm \sqrt{160000 - 160000}}{200} = 2.0 \quad t = 25 \ln(2.0) \\
 X_t &= -200 e^{0.04t} + 800 e^{-0.04t} \quad t = 17.3 \text{ DIAS HASTA } S_t = 400 \\
 X_t &= -200y + 800y^{-1} = -400 + 400 = 0 \\
 -200\zeta + 800\zeta^{-1} &= 120 \quad \text{donde } \zeta = e^{0.04t} \quad \text{luego } 200\zeta^2 + 120\zeta - 800 = 0 \\
 \zeta &= \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-120 \pm \sqrt{14400 + 640000}}{400} = \frac{-120 + 809}{400} = 1.722 \\
 t &= 25 \ln(1.722) = 13.6 \text{ DIAS HASTA } X_t = 120 \text{ Y } S_t = 172.2 + \frac{400}{1.722} = 232.2 = 404.5 \\
 dS_t/dt &= -AS_t = -EX * X_t \quad \therefore \frac{dS_t}{dX_t} = \frac{EX * X_t}{ES * S_t} \\
 dX_t/dt &= -AX_t = -ES * S_t \\
 \int_{SN}^{S_t} S_t * dS_t &= \int_{SN}^{X_t} (EX / ES) X_t * dX_t \\
 \frac{S_t^2}{2} - \frac{SN^2}{2} &= \frac{EX}{ES} \left(\frac{X_t^2}{2} - \frac{XN^2}{2} \right) \\
 S_t^2 - SN^2 &= \frac{1 - SS}{1 - SX} = 4 \\
 X_t^2 - XN^2 &= 4 \\
 X_t &= 4(S_t^2 - SN^2) + XN^2 = 4(400^2 - 500^2) + 600^2 = 0 \quad \text{cuando } S_t = 400 \\
 S_t &= 0.25(X_t^2 - XN^2) + SN^2 = 0.25(120^2 - 600^2) + 500^2 = 404.5 \quad \text{cuando } X_t = 120 \\
 \text{NOTA } KLR &= (600 - 0) / (500 - 400) = 6:1
 \end{aligned}$$

Figura 4.7.2. - MODELO DE ATRICIÓN DE PÉRDIDAS ACEPTABLES (Continuación) -

alcanzasen el 20% de sus efectivos originales (cuando éstos se reducen al 80% de su nivel al comienzo de las hostilidades). En este análisis tratamos de contestar a las preguntas siguientes:

- (1) ¿Qué lado gana (no abandona primero)?
- (2) ¿Cuándo se acaba la guerra?
- (3) ¿Cuántos barcos tiene cada lado al final de la guerra?

4.8 Multiplicadores de fuerza

Aunque teóricamente los recursos militares de ambos lados se asemejan entre sí como dos imágenes gemelas, algo así como las piezas en un tablero de ajedrez, no entran necesariamente en combate de esta manera. Cada vez más, el papel de las fuerzas aéreas se está convirtiendo en un papel de soporte de las fuerzas de superficie causando el máximo daño posible al otro lado, al mismo tiempo que evitan que el enemigo pueda hacer lo mismo. La misión de un lado es la amenaza para el otro; misiones y amenazas son las dos caras opuestas de la misma moneda. El combate aéreo surge de la necesidad de apoyar misiones y de contrarrestar amenazas.

La interdicción del campo de batalla y el apoyo aéreo próximo implican una intervención decisiva en la batalla de tierra, aunque esto es una proposición muy arriesgada debido a la existencia de los misiles modernos tierra-aire. La interdicción del campo de batalla, ya sea por aviones o por helicópteros, estará con nosotros todavía por algún tiempo. Consideremos el Modelo de Apoyo Aéreo Próximo de la Figura 4.8.1.

Por reveladores que sean los números y los valores de eficacia de las unidades, la sola enumeración de los inventarios en tiempos de paz incorporados en las ecuaciones de paridad no puede dar un análisis completo de las capacidades militares. Aunque se

deben tener en cuenta en dicho análisis, los inputs estáticos en tiempo de paz por sí solos son indicadores necesarios pero no suficientes del output dinámico en tiempo de guerra (rendimiento en la ejecución de misiones). Aunque las ecuaciones más famosas de guerra son las ecuaciones de Lanchester, la más famosa de las cuales es la llamada ley cuadrática de Lanchester, existen pruebas de que estos modelos del conflicto militar eran ya bien comprendidos por líderes militares carismáticos a lo largo de la historia. Se ha citado que Napoleón manifestó lo siguiente: «Dios está del lado de la fuerza más fuerte en proporción a los cuadrados de sus efectivos respectivos, cuando todos los otros factores son iguales».

La aplicación más ingeniosa de la famosa ley cuadrática de la paridad como base de una estrategia de combate está atribuida a Lord Nelson, en 1805, en la Batalla de Trafalgar. Nelson se enfrentaba con una fuerza de 46 buques, mientras que su flota disponía de 40 buques. La historia registra que desplegó ocho de sus buques para fijar la mitad de la flota enemiga en la dirección a favor del viento, mientras que su fuerza principal de 32 buques entabló combate con 23 buques en la retaguardia. El «Modelo de la Batalla de Trafalgar» (Figura 4.8.2) ilustra cómo los conceptos de atrición apoyan la estrategia de Nelson. De acuerdo con la ley cuadrática de Lanchester, Nelson se enfrentó con una fuerza de:

$$23^2 + 23^2 = 1058 \quad (4.8.1)$$

Al dividir su fuerza como lo hizo, se enfrentó con el enemigo con un margen de superioridad igual a:

$$(32^2 + 8^2 - 1058)^{1/2} = 5.5 \text{ buques} \quad (4.8.2)$$

Ocho buques era el máximo que podía desplegar para mantener todavía esta superioridad. Si se hubieran asignado menos, no habrían podido contener a los 23 buques enemigos hasta que su fuerza de 32 hubiera destruido al enemigo y hubiera venido en su ayuda.

ECUACIONES DEL MODELO DE EQUILIBRIO DE APOYO AÉREO CERCANO ASTOVL

$L \text{ ASTOVL.K} = \text{ASTOVL.J} - (\text{DT}) (\text{ARCS.JK})$
 NOTA ASTOVL - AVIONES AVANZADOS DE DESPEGUE CORTO Y ATERRIZAJE VERTICAL (AVIONES)
 $N \text{ ASTOVL} = \text{AWS}$
 $C \text{ AWS} = 60$
 NOTE AWS - TAMAÑO DE ALA AEREA (FUNCION DE DESPLAZAMIENTO DE BARCOS)
 $R \text{ ARCS.KL} = \text{ASTOVL.K} * \text{AAV} * \text{MSGCS} * \text{FSCS} * (1 - \text{SSCS})$
 NOTE ARCS - INDICE DE DESGASTE DE APOYO AEREO CERCANO (AVIONES/DIA)
 $C \text{ AAV} = 0.6$
 NOTE AAV - DISPONIBILIDAD DE AVIONES (ADIMENSIONAL)
 $C \text{ FSCS} = 0.2$
 NOTE FSCS - FRACCION DE MISIONES DE APOYO AEREO CERCANO (ADIMENSIONAL)
 $C \text{ SSCS} = 0.967$
 NOTE SSCS - SUPERVIVENCIA DE MISIONES DE APOYO AEREO CERCANO (PROBABILIDAD)
 $C \text{ MSGCS} = 5.0$
 NOTE MSGCS - Nº MAX. DE MISIONES GENERALES DE APOYO AEREO CERCANO (NUMEROS/DIA)
 NOTE MSGCS ES UNA FUNCION DE RADIO DE COMBATE (CRCS)
 $R \text{ SGRCS.KL} = \text{ASTOVL.K} * \text{AAV} * \text{MSGCS} * \text{FSCS}$
 NOTE SGRCS - INDICE DE MISIONES GENERALES DE APOYO AEREO CERCANO (NUMEROS/DIA)
 $L \text{ CSCS.K} = \text{CSCS.J} + (\text{DT}) (\text{SGRCS.JK})$
 $N \text{ CSCS} = 0$
 NOTE CSCS - MISIONES CUMULATIVAS DE APOYO AEREO CERCANO (MISIONES)
 $A \text{ CSMCS.K} = \text{CSCS.K} * \text{CRCS}$
 NOTE CSMCS - MISIONES CUMULATIVAS-MILLAS DE APOYO AEREO CERCANO (MISIONES-MILLA)
 $A \text{ SMPLCS.K} = \text{CSMCS.K} / \text{CLCS.K}$
 NOTE SMPLCS - MISIONES-MILLA POR PERDIDA EN APOYO AEREO CERCANO (MISIONES - MILLA/AVION)
 $L \text{ CLCS.K} = \text{CLCS.J} + (\text{DT}) (\text{ARCS.JK})$
 NOTE CLCS - PERDIDAS CUMULATIVAS EN MISIONES DE APOYO AEREO CERCANO (AVIONES)
 $A \text{ CPMCS.K} = \text{CSMCS.K} * \text{PCS}$
 NOTE CPMCS - CARGA UTIL CUMULATIVA-MILLAS EN MISIONES DE APOYO AEREO CERCANO
 NOTE (LIBRAS - MILLA)
 $C \text{ PCS} = 8000$
 NOTE PCS - CARGA UTIL (FUNCION DE 6 ROCKEYES, CAÑON Y 2 MISILES ASRAAM)
 $C \text{ CRCS} = 200$
 NOTE CRCS - AREA DE COMBATE CON APOYO AEREO CERCANO (MILLAS)
 $S \text{ PMPLCS.K} = \text{CPMCS.K} / \text{CLCS.K}$
 NOTE PMPLCS - CARGA UTIL-MILLA POR PERDIDAS EN APOYO AEREO CERCANO
 NOTE (LIBRAS - MILLA/AVION)

Figura 4.8.1 - MODELO DE APOYO AÉREO CERCANO -

$$\frac{ASTOVL_t - ASTOVL_{t-1}}{DT} = -ARCS_t$$

$$\frac{d ASTOVL_t}{dt} = -ASTOVL_t * AAV * MSGCS * FSCS * (1 - SSCS)$$

$$ASTOVL_t = ASTOVL_o e^{-AAV * MSGCS * FSCS * (1 - SSCS)t}$$

$$CSCS_t = AAV * MSGCS * FSCS * ASTOVL_o * \int_0^t e^{-AAV * MSGCS * FSCS * (1 - SSCS)t} dt$$

$$CSCS_t = \frac{AAV * MSGCS * FSCS * ASTOVL_o}{-AAV * MSGCS * FSCS * (1 - SSCS)} e^{-AAV * MSGCS * FSCS * (1 - SSCS)t} \Big|_0^t$$

$$CSCS_t = \frac{ASTOVL_o}{(1 - SSCS)} (1 - e^{-AAV * MSGCS * FSCS * (1 - SSCS)t})$$

$$CSMCS_t = CSCS_t * CRCS$$

$$CSMCS_t = \frac{CRCS * ASTOVL_o}{(1 - SSCS)} (1 - e^{-AAV * MSGCS * FSCS * (1 - SSCS)t})$$

$$CPMCS_t = CSMCS_t * PCS$$

$$CPMCS_t = \frac{CRCS * PCS * ASTOVL_o}{(1 - SSCS)} (1 - e^{-AAV * MSGCS * FSCS * (1 - SSCS)t})$$

$$CLCS_t = \int_0^t ARCS_t dt$$

$$CLCS_t = AAV * MSGCS * FSCS * (1 - SSCS) * ASTOVL_t$$

$$CLCS_t = ASTOVL_o (1 - e^{-AAV * MSGCS * FSCS * (1 - SSCS)t})$$

$$SMPLCS_t = CSMCS_t / CLCS_t$$

$$SMPLCS_t = CRCS / (1 - SSCS)$$

$$PMPLCS_t = CPMCS_t / CLCS_t$$

$$PMPLCS_t = \frac{CRCS * PCS}{1 - SSCS}$$

- ANÁLISIS DE EQUILIBRIO DE APOYO AÉREO CERCANO CON AVIONES AVANZADOS DE DESPEGUE CORTO Y ATERRIZAJE VERTICAL -

Figura 4.8.1 - MODELO DE APOYO AÉREO CERCANO (Continuación) -

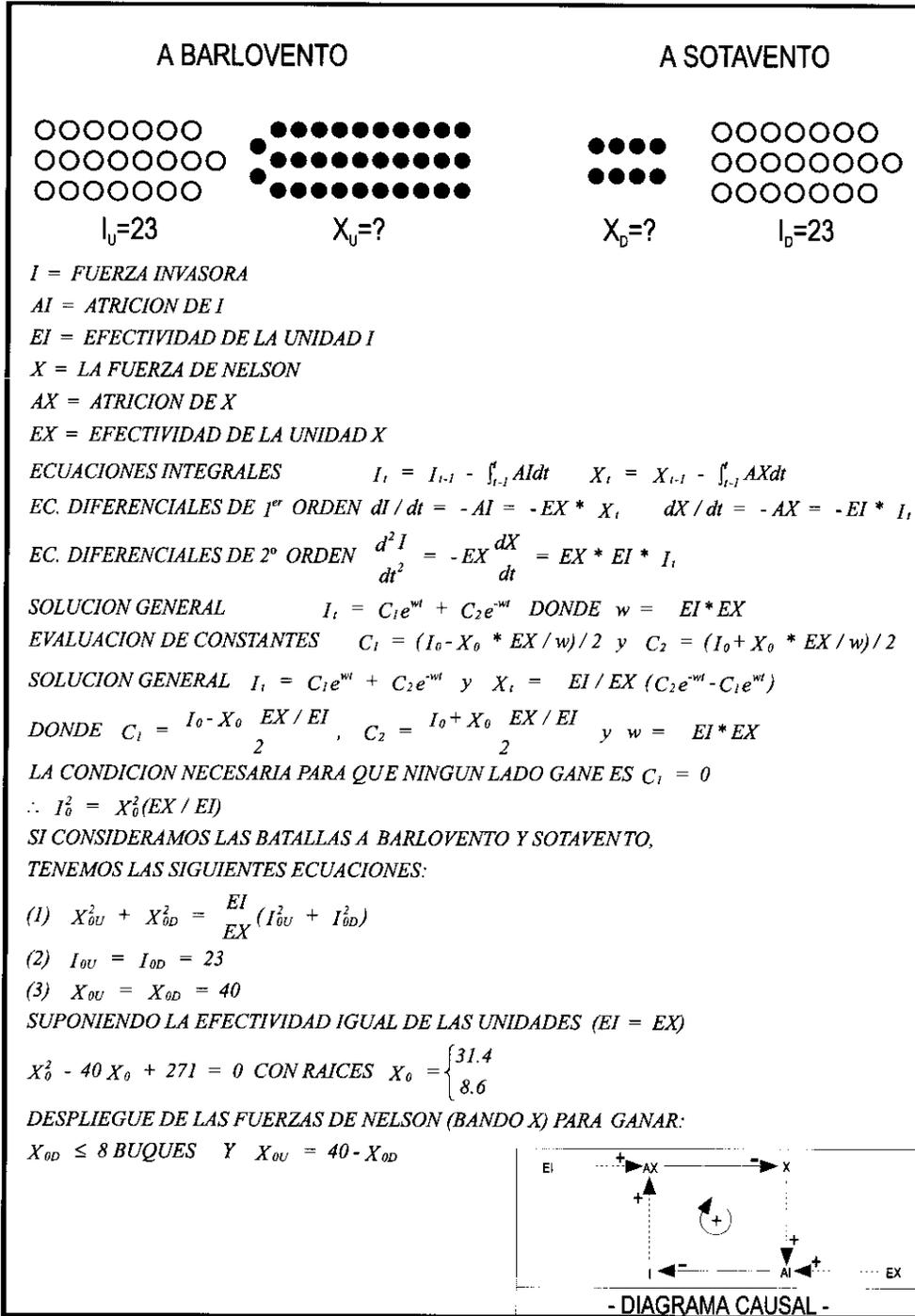


Figura 4.8.2. - MODELO DE BATALLA DE TRAFALGAR -

4.9 Disponibilidad para el combate

Las funciones de mantenimiento en el Departamento de Defensa de los Estados Unidos se realizan normalmente en tres niveles o escalas (con nombres característicos de los tres cuerpos armados, ejército, armada y aviación): el nivel de organización (o servicio), el nivel intermedio (bajo responsabilidad predominante de personal militar), y el nivel de depósito (bajo responsabilidad de personal civil). Los dos primeros niveles forman parte de las unidades de combate a las que apoyan; el tercer nivel forma parte normalmente de un organismo logístico importante en alguno de los departamentos militares [32].

En la Figura 4.9.1 se muestran las relaciones entre los parámetros de mantenimiento y sus efectos sobre la disponibilidad de los aviones para el combate. Como se muestra en esta figura, la disponibilidad de los aviones, $AV\$$, es una función del número total de aviones disponibles para el combate, $\$$, del número de aviones en mantenimiento organizativo, $\$SOM$, del número de aviones en mantenimiento intermedio, $\$IM$, y del número de aviones en mantenimiento de depósito, $\$SDM$.

La disponibilidad de los aviones es máxima cuando el número de aviones en los tres niveles de mantenimiento es mínimo. El número de aviones en cada nivel de mantenimiento depende del número que haya entrado para mantenimiento en cada nivel (es decir, $\$$ entrado para mantenimiento organizativo, $\$SOMI$), y del número de aviones cuyo mantenimiento haya concluido en ese nivel (es decir, $\$$ mantenimiento de organización completado, $\$SOMC$). El número de aviones que han entrado para mantenimiento organizativo depende directamente del número de aviones listos para combate, e inversamente del tiempo medio entre mantenimientos, $\$SMTBM$. Por otra parte, el número de aviones cuyo mantenimiento organizativo ha terminado depende directamente del número en mantenimiento organizativo, $\$SOM$, e inversamente del tiempo medio de inactividad por mantenimiento, $\$SMMDT$. La naturaleza del trabajo realizado en mantenimiento organizativo consiste principalmente en inspecciones visuales, comprobaciones operativas, pequeños servicios,

NOTE *****

NOTE LA DISPONIBILIDAD ES UN INDICE DE LA PREPARACION DEL SISTEMA DE ARMAMENTOS. ES UNA FUNCION DE OFERTA Y DEMANDA LA OFERTA O CAPACIDAD DE LAS INSTALACIONES DE MANTENIMIENTO Y LA DEMANDA QUE PIDE ESTOS SERVICIOS BASADOS EN LA SEGURIDAD DE LOS AVIONES. EL MANTENIMIENTO SE LLEVA A CABO A TRES NIVELES: EL ORGANIZATIVO (SERVICIO), EL INTERMEDIO (PREDOMINANTEMENTE CON PERSONAL MILITAR), Y EL DE DEPOSITO (CON PERSONAL CIVIL). EL DESGLOSE DE LAS ECUACIONES DEL MODELO APARECEN ABAJO.

NOTE *****

A $AV\$$.K = \$$.K / (\$$.K + \$\$OM.K + \$\$IM.K + \$\$DM.K)$

NOTE AV\$\$ - LA DISPONIBILIDAD DE AVIONES USA (PROB)

L $\$$.K = \$$.J + (DT) (\$\$OMC.JK - \$\$OMI.JK + \$\$IMC.JK - \$\$IMI.JK + \$\$DMC.JK - \$\$DMI.JK)$

N $\$\$ = \$\$N$

NOTE $\$\$$ - AVIONES USA LISTOS PARA EL COMBATE (AVIONES)

C $\$\$N = 1000$

NOTE $\$\N - NUMERO INICIAL DE AVIONES USA LISTOS PARA EL COMBATE (AVIONES)

L $\$\$DM.K = \$\$DM.J + (DT) (\$\$DMI.JK - \$\$DMC.JK)$

N $\$\$DM.K = \$\DMN

NOTE $\$\DM - \$\$ NUMERO EN MANTENIMIENTO DE DEPOSITO (AVIONES)

C $\$\$DMN = 0$

NOTE $\$\DMN - \$\$ NUMERO INICIAL EN MANTENIMIENTO DE DEPOSITO (AVIONES)

L $\$\$IM.K = \$\$IM.J + (DT) (\$\$IMI.JK - \$\$IMC.JK)$

N $\$\$IM = \$\IMN

NOTE $\$\IM - \$\$ EN MANTENIMIENTO INTERMEDIO (AVIONES)

C $\$\$IMN = 0$

NOTE $\$\IMN - \$\$ INICIAL EN MANTENIMIENTO INTERMEDIO (AVIONES)

L $\$\$OM.K = \$\$OM.J + (DT) (\$\$OMI.JK - \$\$OMC.JK)$

N $\$\$OM = \$\OMN

NOTE $\$\OM - \$\$ EN MANTENIMIENTO ORGANIZATIVO (AVIONES)

C $\$\$OMN = 0$

NOTE $\$\OMN - \$\$ NUMERO INICIAL EN MANTENIMIENTO ORGANIZATIVO (AVIONES)

R $\$\$OMI.KL = \$$.K / \$\$MTBM$

NOTE $\$\OMI - \$\$ MANTENIMIENTOS ORGANIZATIVOS INICIADOS (AVIONES/DIA)

C $\$\$MTBM = 4$

NOTE $\$\$MTBM$ - \$\$ TIEMPO MEDIO ENTRE MANTENIMIENTOS (DIAS)

R $\$\$DMI.KL = \$$.K * \$\$FRTD / \$\$MTBF$

NOTE $\$\DMI - \$\$ MANTENIMIENTOS DE DEPOSITOS INICIADOS (AVIONES/DIA)

C $\$\$FRTD = 0.6$

NOTE $\$\$FRTD$ - \$\$ FRACCION PARA REPARAR EN MANTENIMIENTO DE DEPOSITO (ADIMENSIONAL)

C $\$\$MTBF = 3$

NOTE $\$\$MTBF$ - \$\$ TIEMPO MEDIO ENTRE AVERIAS (DIAS)

R $\$\$IMI.KL = \$$.K * (1 - \$\$FRTD) / \$\$MTBF$

NOTE $\$\IMI - \$\$ MANTENIMIENTOS INTERMEDIOS INICIADOS (AVIONES/DIA)

R $\$\$OMC.KL = \$\$OM.K / \$\$MMDT$

NOTE $\$\OMC - \$\$ MANTENIMIENTOS ORGANIZATIVOS TERMINADOS (AVIONES/DIA)

C $\$\$MMDT = 1.0$

NOTE $\$\$MMDT$ - \$\$ TIEMPO MEDIO DE MANTENIMIENTO (DIAS)

C $\$\$MTTR = 1.25$

NOTE $\$\$MTTR$ - \$\$ TIEMPO MEDIO DE REPARACION (DIAS)

R $\$\$IMC.KL = \$\$IM.K / \$\$MTTR$

NOTE $\$\IMC - \$\$ MANTENIMIENTOS INTERMEDIOS TERMINADOS (AVIONES/DIA)

R $\$\$DMC.KL = \$\$DM.K / \$\$MTTR$

NOTE $\$\DMC - \$\$ MANTENIMIENTOS DE DEPOSITO TERMINADOS (AVIONES/DIA)

NOTE *****

NOTE (A) INDICAR EL DIAGRAMA CAUSAL

NOTE (B) HALLAR LOS VALORES ESTACIONARIOS DE LAS VARIABLES DE NIVEL

NOTE $\$\$ =$ _____ $\$\$IM =$ _____

NOTE $\$\$DM =$ _____ $\$\$OM =$ _____

NOTE (C) HALLAR EL VALOR ESTACIONARIO DE AV\$\$ SI $\$\$FRTD = 0.2$

NOTE EN VEZ DE 0.6 $AV\$\$ =$ _____

Figura 4.9.1. - MODELO DE DISPONIBILIDAD PARA COMBATE -

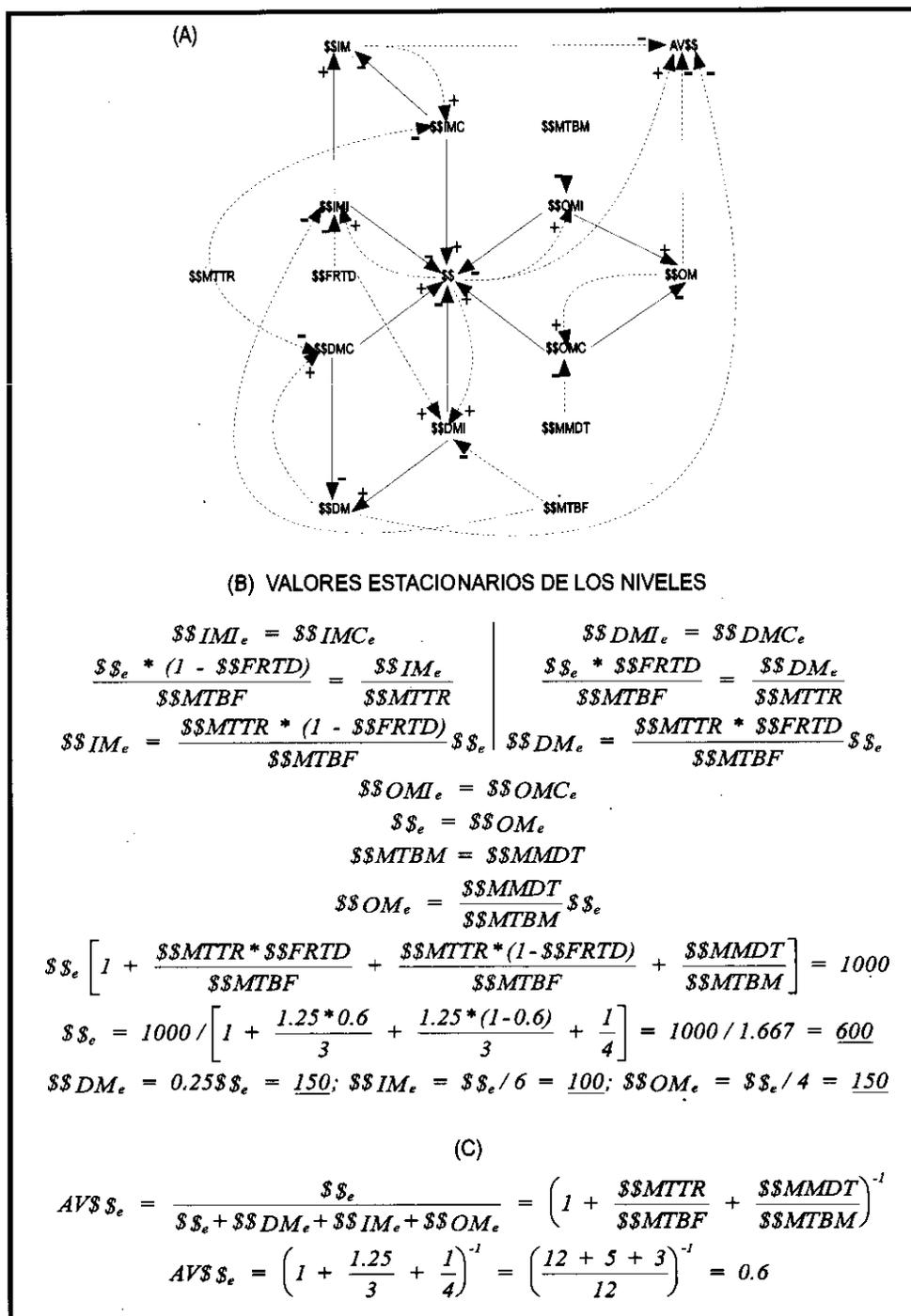


Figura 4.9.1. - MODELO DE DISPONIBILIDAD PARA COMBATE (Continuación) -

ajustes externos, cambios de algunos componentes, etc. Por consiguiente se espera que la frecuencia de demanda para servicios de este tipo sea alta, y que el tiempo necesario para llevar a cabo este mantenimiento sea relativamente corto. Obviamente, la disponibilidad de aviones de combate puede ser mejorada por la disminución del tiempo medio de los aviones en reparación. Esto puede lograrse asignando un presupuesto mayor de operaciones y mantenimiento para dichos servicios.

Análogamente, el número de aviones en mantenimiento intermedio y de depósito depende directamente del número de llegadas (aviones que requieren el servicio), e inversamente del número de aviones cuyo mantenimiento ha terminado en cada nivel. Los ritmos de llegada dependen directamente del número de aviones listos para el combate, e inversamente del tiempo medio entre fallos, $\$M\text{TF}$. Por otro lado, el número de aviones reparados en mantenimiento intermedio de depósito depende directamente del número de aviones en cada nivel, e inversamente del tiempo medio de reparación, $\$M\text{TTR}$. El tiempo medio de reparación de los aviones es relativamente mayor que el tiempo medio de inactividad de los aviones, debido a la complejidad del trabajo realizado en el mantenimiento intermedio y de depósito. Por ejemplo, la naturaleza del mantenimiento realizado en el nivel intermedio consiste principalmente en una inspección detallada y en la verificación de los sistemas, operaciones importantes de servicio, reparaciones y modificaciones importantes de equipos, ajustes complicados, calibrado limitado, y sobrecargas originadas en el nivel de organización de mantenimiento. La naturaleza de las actividades de mantenimiento a nivel de depósito son ajustes de fábrica normalmente complicados, reparaciones y modificaciones complejas de equipos, operaciones de servicio y de reconstrucción, calibrados detallados y sobrecargas originadas en el nivel intermedio de mantenimiento.

En la Figura 4.9.1 se muestra el diagrama causal y las ecuaciones DYNAMO para el Modelo de Disponibilidad para el Combate. En esta figura se emplea el análisis de estado estacionario para hallar el número de aviones en cada nivel de mantenimiento y de estos se deduce la disponibilidad de los aviones para el combate.

4.10 Economía de defensa

El personal de planificación de defensa se enfrenta con la dificultad de distribuir de forma prudente los recursos financieros y humanos disponibles para satisfacer las exigencias competitivas de varias amenazas simultáneas. Desde la aparición de las armas nucleares, el problema se ha centrado en las necesidades de las fuerzas estratégicas en relación con las necesidades de las fuerzas convencionales. El dilema planteado es si debe darse prioridad a la amenaza más destructiva pero menos probable, o a la amenaza más probable con un potencial destructivo variable. En el pasado, han prevalecido los partidarios de la primera alternativa, de acuerdo con una política implícita de «disuasión por destrucción asegurada», es decir, la capacidad, después de absorber un ataque enemigo, de imponer un «daño inaceptable» a la población e industria enemigas. En la actualidad, debido al fin de la guerra fría, la destrucción asegurada se ha hecho irrelevante.

Como resultado del equilibrio estratégico de terror a lo largo de las últimas décadas, la importancia del potencial aéreo en las fuerzas convencionales americanas ha aumentado de forma dramática. Aunque en el presupuesto actual se están asignando más fondos a las fuerzas aéreas tácticas que a todos los componentes de las fuerzas nucleares estratégicas o a todas las fuerzas combinadas de superficie, debido al agudo y continuo aumento en los precios de los aviones, las fuerzas aéreas tácticas están recibiendo menos aviones y modernizándose a un ritmo menor que en cualquier período desde los años 60. La aviación táctica parece correr el peligro de desaparecer debido a los aumentos de costes, producidos por los esfuerzos para superar unas defensas cada vez más eficaces. Las tasas potenciales de atrición por combate de los aviones debidas a defensas aéreas sofisticadas y complementarias, misiles modernos tierra-aire y sistemas antiaéreos, pueden causar una reducción mucho más rápida en el tamaño de la fuerza aérea táctica que la sufrida en la Segunda Guerra Mundial, Corea y Vietnam. El efecto acumulativo de las tasas previstas de atrición y de obsolescencia pone de manifiesto los factores en juego relativos

al coste del ciclo de vida, y demuestra el ímpetu necesario para el desarrollo de conceptos para una mejor planificación de la defensa.

La seguridad nacional depende de muchos factores, militares, humanos, tecnológicos, y económicos. En el Modelo de la Economía de Defensa (Figura 4.10.1), tratamos de interpretar y definir la fuerza económica de la nación en relación con sus fuerzas militares. Como prueba inicial, identifiquemos tres niveles de la economía de defensa: (1) la cantidad de recursos nacionales disponibles, en la actualidad y en el futuro; (2) la proporción de estos recursos asignados a la defensa nacional; y (3) la eficacia con que se usan los recursos asignados. El primero, o nivel más alto, se considera en este modelo.

Para los objetivos de este modelo, las estadísticas del Producto Nacional Bruto se dividen en categorías mutuamente exclusivas y colectivamente exhaustivas. El método usado más comúnmente para la subdivisión está basado en la «International Standard Industrial Classification (ISIC)» (Clasificación Internacional Industrial Estándar) [33]. Las categorías principales de ISIC son la agricultura, minería, manufacturas, electricidad, gas y agua, transporte, construcción, comercio y servicios; éstas no se prestan bien a las necesidades de esta aplicación y fueron, por consiguiente, reorganizadas para formar ahora cuatro categorías pertinentes: industria aeroespacial, industria de defensa (excluida la aeroespacial), industria de transporte aéreo e industria no de defensa (excluido el transporte aéreo) [34] [35]. Los parámetros principales para la representación de la dinámica del crecimiento económico de cada una de estas categorías se muestra en la Figura 4.10.1. En esta figura las cuatro industrias se desarrollan en paralelo comenzando en la cabecera de la página con el parámetro «capital», y terminando a pie de página con «producto» o valor añadido por cada categoría industrial. Los valores de los cuatro productos se suman para obtener el **GNP**, el Producto Nacional Bruto de los Estados Unidos. La «Fracción del **GNP** Dedicada al Presupuesto del Gobierno», **FGNPGB**, cuando se multiplica por el **GNP** determina el parámetro **FGB**, el «Presupuesto del Gobierno Federal». La inflación se trata como una variable, **IGR**, el «Índice del Crecimiento Inflacionario» [36].

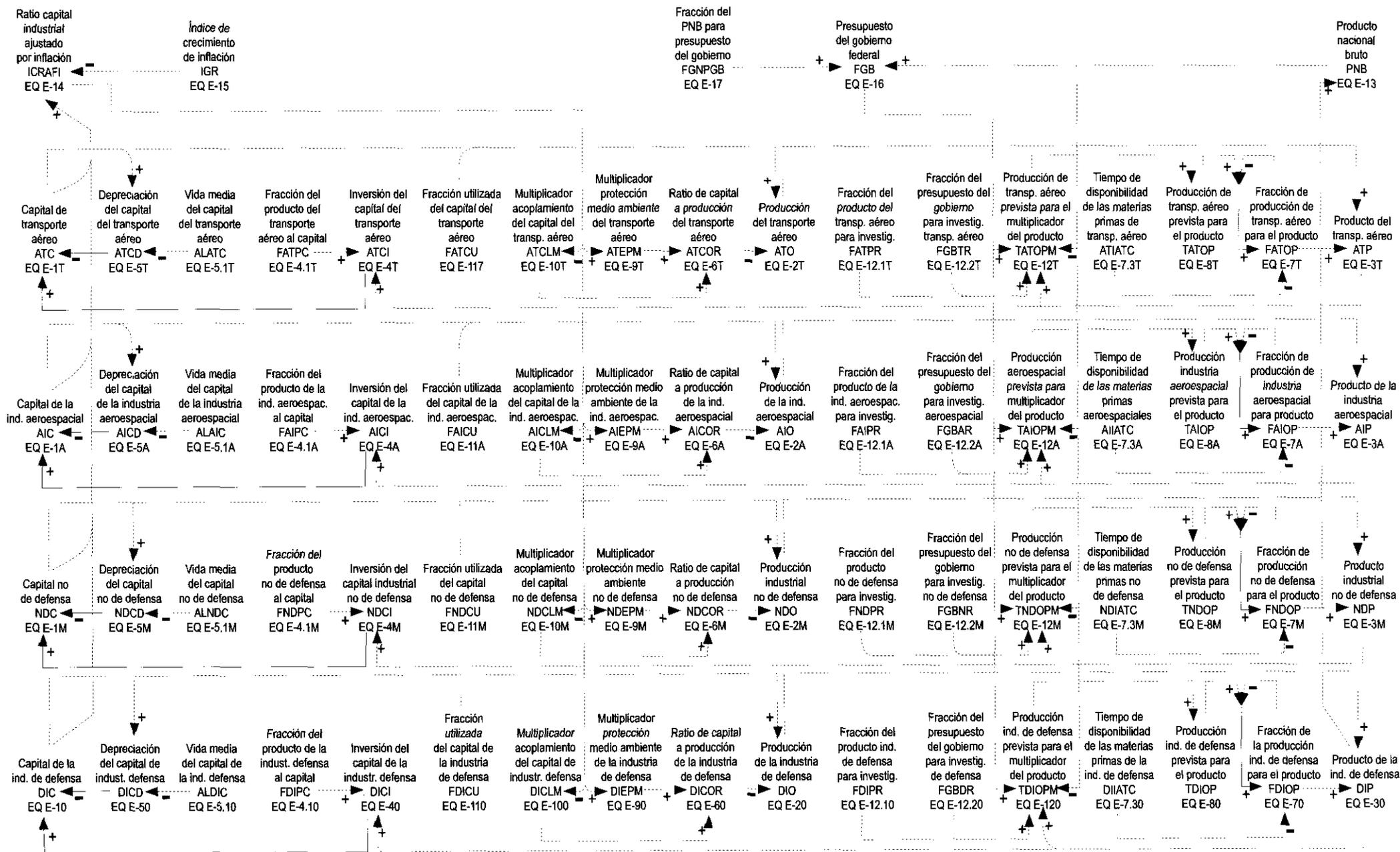


Figura 4.10.1 - MODELO DE LA ECONOMÍA DE DEFENSA -

En la Figura 4.10.2 el output para el Modelo de la Economía se muestra con un índice de la inflación del 2,5% tomado de 1980 como año base. Moussavi [37] ha aplicado análisis de input-output al modelo para examinar el efecto del aumento del producto de la industria de la defensa en los otros sectores de la economía, así como en el Producto Nacional Bruto. Por medio de este método, se pueden probar varios escenarios para hallar los valores óptimos de la demanda final para la industria de defensa, la industria aeroespacial, y el producto de la industria del transporte aéreo que resultarían en el valor máximo del **GNP**.

4.11 Modelo del presupuesto de defensa

En la Sección anterior, organizada alrededor del modelo de la economía, consideramos la jerarquía máxima de la economía de defensa, es decir, la cantidad de recursos nacionales disponibles. En esta Sección, organizada alrededor del Modelo del Presupuesto, nos ocupamos de los problemas relativos a la proporción de estos recursos asignados a la seguridad nacional y a la forma en la que estos recursos se utilizan en los niveles dos y tres de la jerarquía. Los problemas del segundo nivel son responsabilidad específica de la Oficina del Presupuesto, y de los Comités de Asignaciones del Congreso, aunque todos los departamentos ministeriales están profundamente implicados [38]. En el Modelo del Presupuesto (véanse las Figuras 4.11.1(a) y 4.11.1(b)), el parámetro de decisión del segundo nivel es la **FGBDOD**, la «Fracción del Presupuesto del Gobierno para el Departamento de Defensa». Cuando esta fracción se multiplica por el tamaño del presupuesto federal, se obtiene el **IDODMB**, el «Presupuesto Militar del Departamento de Defensa» usado en el modelo.

Los otros parámetros del Modelo de Presupuesto (unos 116 desde DB-3 hasta DB-18) se refieren al tercer nivel, que es el más bajo de la jerarquía. Los problemas a este nivel, el uso eficaz de los recursos designados para la defensa, son principalmente problemas internos de los departamentos y organismos de defensa. Los problemas estriban en la elección eficaz o económica entre los distintos métodos

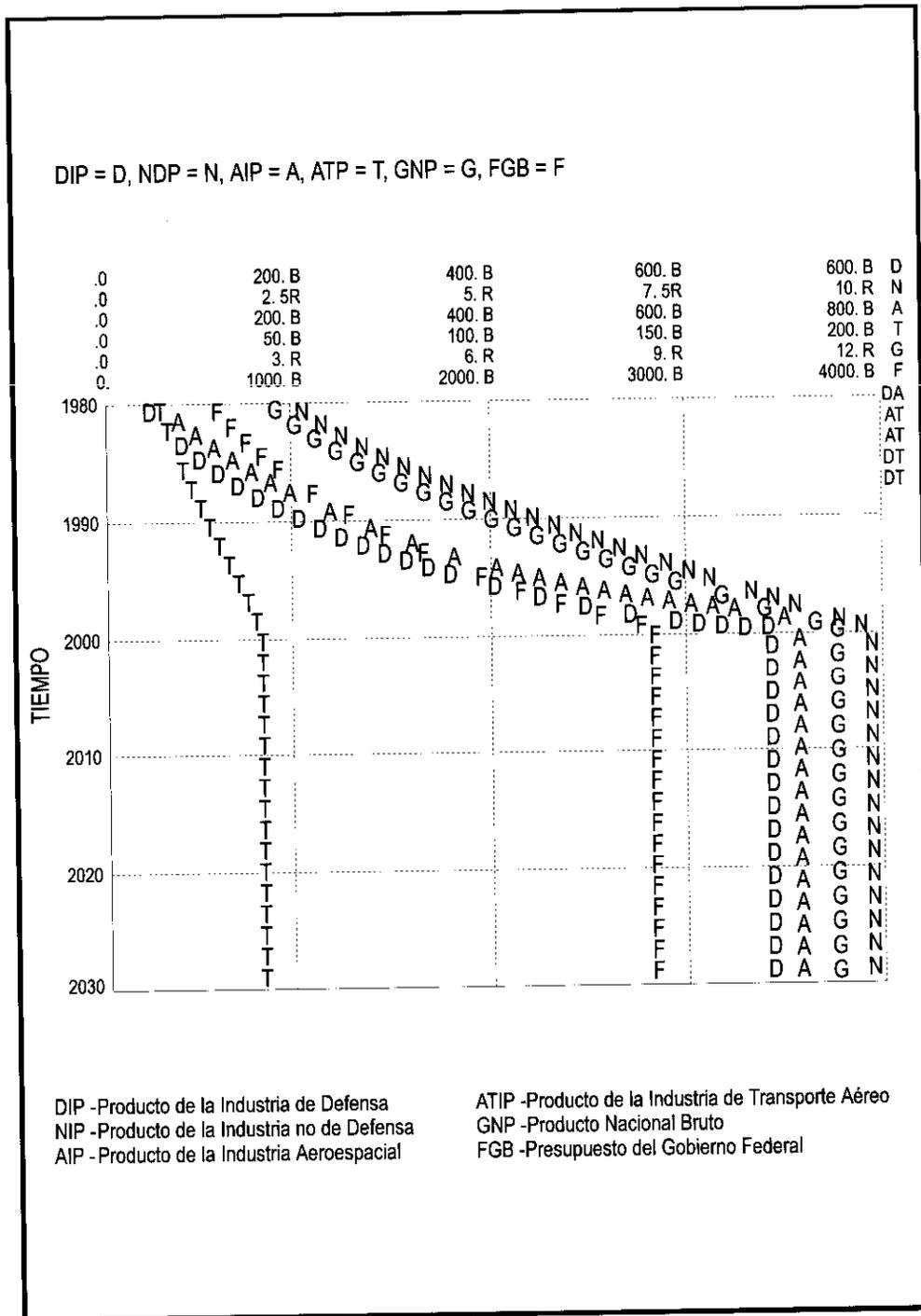


Figura 4.10.2 - RESULTADOS DEL MODELO DE LA ECONOMÍA -

para llevar a cabo las tareas, objetivos, o misiones militares. Los métodos alternativos pueden consistir en estrategias diferentes, tácticas diferentes, distintas fuerzas, o armas diferentes.

La organización del Submodelo de Presupuesto refleja la distribución del Presupuesto Militar del Departamento de Defensa entre las distintas fuerzas armadas y categorías de actividades descritas anteriormente. La Figura 4.11.1 (a) describe el Subsistema de Adquisiciones, y la Figura 4.11.1 (b) muestra los Subsistemas de Operaciones y Mantenimiento y de RDT&E (Investigación, Desarrollo, Formación e Ingeniería). Cada uno de los 118 parámetros de la figura se expresan en el modelo en forma de ecuaciones. Desde el punto de vista de un problema de optimización de múltiples variables, la tarea es hallar la fracción del presupuesto dotado que debe ser asignada a las distintas categorías, de forma que se maximice la eficacia militar, sujeta a la condición de que la suma de todas las asignaciones fraccionales sea igual a la unidad.

En la Figura 4.11.2 se presenta el Modelo de Compensación del Presupuesto de Aviones; el objetivo es comprender cómo una asignación presupuestaria para adquisiciones, investigación y desarrollo, y operaciones de mantenimiento, afecta al inventario, la supervivencia y a la capacidad destructiva. Esto contribuirá a determinar los ganadores y perdedores cuando estos se modelen en el contexto de los conceptos de atrición. El análisis pretende dar respuestas a preguntas como las siguientes:

- (1) ¿Quién gana con esta asignación; se derrota a la amenaza?
- (2) ¿Cuál es el ratio relativo de intercambio?
- (3) ¿Cuál es «la Fracción del Presupuesto para Adquisiciones», **FBP**, necesaria para derrotar a la amenaza?

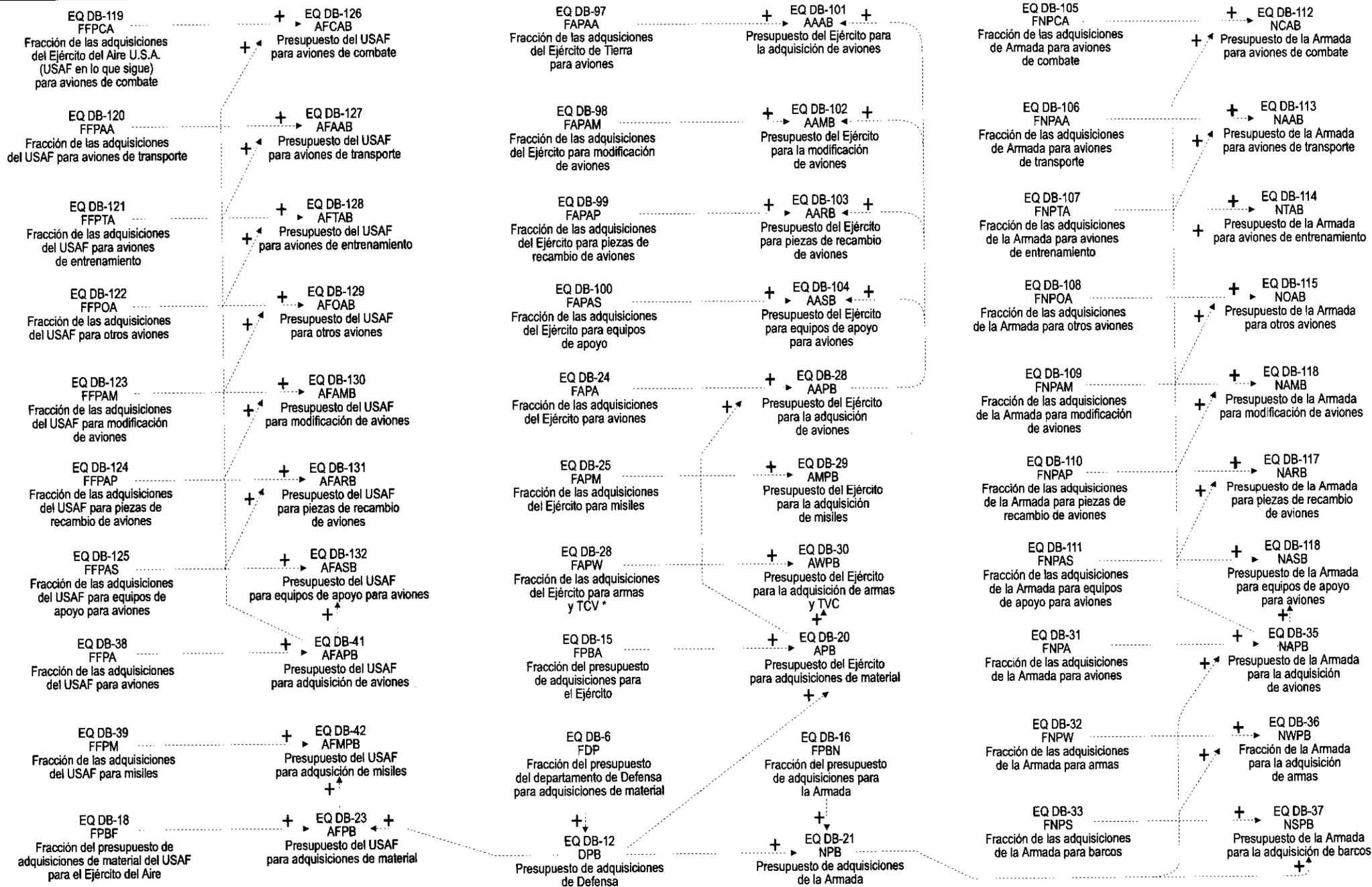
En conclusión, este sencillo modelo dramatiza una función importante de la modelación: la relación entre las variables de decisión asociadas con la asignación de recursos y una medida de la eficacia.

4.12 Resumen

Una de las grandes ironías en el desajuste inmemorial entre la eficiencia civil y la eficacia militar es debida a la forma contradictoria en que se juzga las nuevas tecnologías en diferentes entornos. En la esfera industrial, esto se denomina progreso. Desde el punto de vista de los militares, esto se considera «un baño de oro». El personal de planificación de defensa ha considerado con razón desde hace tiempo que las armas tienen que ser tecnológicamente superiores a las del enemigo. El gasto en tecnología tiene sentido para los militares, lo mismo que en el sector privado, porque la tecnología es normalmente un sustituto de las personas, y en nuestra sociedad las personas constituyen un recurso más valioso que el capital. Algunos reformadores de la defensa, comprometidos con las reducciones presupuestarias, no han comprendido lo que es realmente el fenómeno de la evolución de las armas: la misma tendencia de sustitución tecnológica que se está produciendo en toda la sociedad. Hacer la guerra no es en principio distinto a cualquier proceso de transformación de recursos, y se deben buscar mejoras de forma tan intensa como en la agricultura, minería, manufacturas y construcción. De hecho, la automatización de las fuerzas militares tiene incluso más sentido que en otros sectores, en donde la mano de obra humana se consume sólo en un sentido figurado.

Básicamente, el problema de decidir si una tecnología militar existente tiene que ser reemplazada por otra nueva, o de elegir entre tecnologías alternativas, requiere la consideración de las tres medidas principales de la eficacia de los sistemas militares: supervivencia, inventario y disponibilidad.

Las decisiones militares pueden clasificarse por clase y nivel. Es útil distinguir entre las decisiones operativas (estrategia y táctica), adquisiciones o decisiones sobre la composición de fuerzas, y decisiones sobre la investigación y el desarrollo. Desde el punto de



* TVC : Vehículos para transporte de tanques

NOTA : Hay que distinguir entre las adquisiciones de material (columna 1) y el presupuesto (columna 2). En la columna 1 se dan las fracciones de las adquisiciones totales dedicadas a los distintos capítulos (aviones de combate, de transporte, etc.). En la columna 2 se dan los presupuestos para los distintos capítulos (en \$ presumiblemente).

Figura 4.11.1 (a) - MODELO DEL PRESUPUESTO DE DEFENSA -

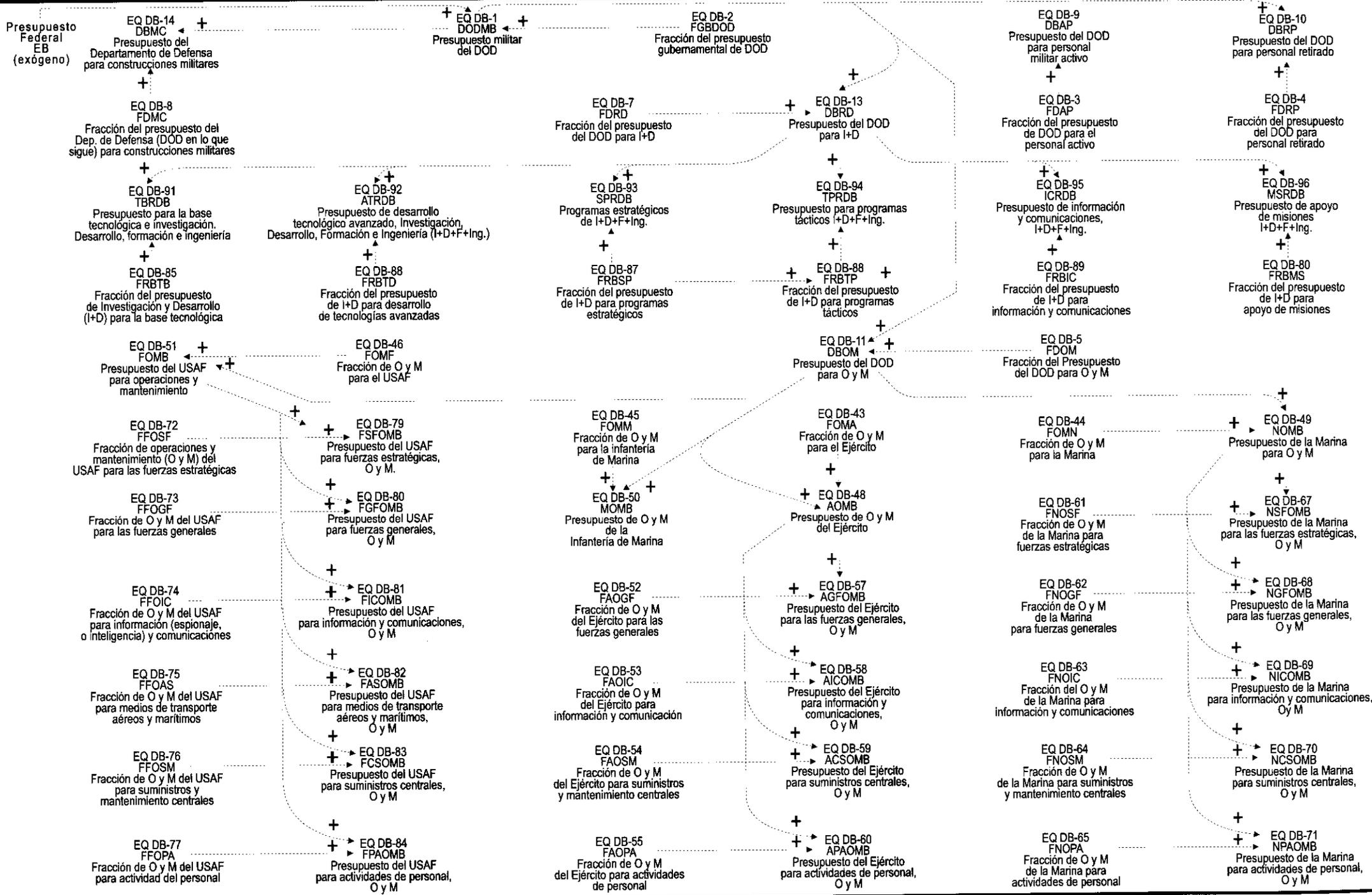


Figura 4.11.1 (b) - MODELO DEL PRESUPUESTO DE DEFENSA -

```

NOTE *****
NOTE ***** MODELO DE COMPENSACION DEL PRESUPUESTO DE AVIONES *****
NOTE *****
L A.K = A.J - (DT) (AA.JK)
N A = AN
NOTE A - AVIONES
N AN = AP * DPB
NOTE AN - AVIONES INICIALES
C DPB = 1000
NOTE DPB - DURACION DEL PRESUPUESTO EN TIEMPO DE PAZ (DIAS)
N AP = B * FBP / PC
NOTE AP - ADQUISICION DE AVIONES (AVIONES/DIA)
C B = 100E6
NOTE B - PRESUPUESTO ($/DIA)
N FBP = 1 - (FBOM + FBRD)
NOTE FBP - FRACCION DEL PRESUPUESTO PARA ADQUISICION DE MATERIAL (ADIMENSIONAL)
C PC = 50E6
NOTE PC - COSTE DE ADQUISICION ($/AVIONES)
A AE.K = AAV.K * SR * SL
NOTE AE - EFICACIA DE AVIONES (AMENAZAS / DIA-AVION)
C SR = 2
NOTE SR - INDICE DE MISIONES (MISIONES / DIA)
C SL = 0.0625
NOTE SL - EFECTO DESTRUCTOR DE LAS MISIONES (AMENAZAS / MISION-AVION)
A AAV.K = SQRT (FBOM) (RAIZ CUADRADA DEL FBOM)
NOTE AAV - DISPONIBILIDAD DE LOS AVIONES (ADIMENSIONAL)
C FBOM = 0.2
NOTE FBOM - FRACCION DEL PRESUPUESTO PARA OPERACIONES Y MANTENIMIENTO (ADIMENSIONAL)
A TE.K = 1 - SS.K
NOTE TE - EFICACIA DE LAS AMENAZAS (AVIONES / DIA-AMENAZA)
A SS.K = 1 - (FBRD ** 3) (1 MENOS EL CUBO DE FBRD)
NOTE SS - SUPERVIVENCIA DE AVIONES EN MISION (AVIONES / DIA-AMENAZA)
N FBRD = FBOM
NOTE FBRD - FRACCION DEL PRESUPUESTO PARA I + D (ADIMENSIONAL)
R AA.KL = CLIP (T.K * TE.K, 0, T.K, 0)
NOTE AA - PERDIDAS DE AVIONES POR ATRICION (AVIONES / DIA)
L T.K = T.J - (DT) (TA.JK)
N T = TN
NOTE T - AMENAZA
C TN = 2000
NOTE TN - AMENAZAS INICIALES
R TA.KL = CLIP (A.K * AE.K, 0, A.K, 0)
NOTE TA - DISMINUCION DE AMENAZAS POR ATRICION (AMENAZAS / DIA)
A RXR.K = XR.K / IR
NOTE RXR - RATIO DE INTERCAMBIO RELATIVO (ADIMENSIONAL)
N IR = TN/AN
NOTE IR - RATIO DE INVENTARIO (AMENAZAS / AVION)
A XR.K = TD.K / AL.K
NOTE XR - RATIO DE INTERCAMBIO (AMENAZAS / AVION)
A TD.K = TN - T.K
NOTE TD - AMENAZA DESTRUIDA
A AL.K = AN - A.K
NOTE AL - AVIONES PERDIDOS EN ACCION

```

Figura 4.11.2 - MODELO DE COMPENSACIÓN DEL PRESUPUESTO DE AVIONES -

vista del análisis, la diferencia básica entre este tipo de decisiones está en el momento en que éstas afectan a la capacidad de las fuerzas militares implicadas. Una decisión operativa puede afectar la capacidad casi inmediatamente. Una decisión de adquirir algo, por otra parte, no puede afectar la capacidad hasta que la adquisición haya sido hecha e incorporada en las fuerzas operativas. Cuando los presupuestos de asignación de recursos se incorporan a los modelos apropiados de atrición, se establece la relación entre las variables de decisión de tiempos de paz y las medidas de eficacia en tiempos de guerra.

En el entorno de una organización moderna de defensa, los tipos de problemas a los que se aplican el análisis de sistemas son principalmente los siguientes: composición de fuerzas, investigación y desarrollo, selección de armamentos, y desarrollo de recursos humanos seleccionados y de políticas logísticas. En gran medida estos problemas son diferentes a los problemas operativos estudiados en la Segunda Guerra Mundial. Hoy en día se da menor énfasis al óptimo empleo táctico de las armas, y se da una importancia mucho mayor a las decisiones importantes relativas a la asignación de recursos para distintas agrupaciones de fuerzas, y al desarrollo y adquisición de un arma en lugar de otra.

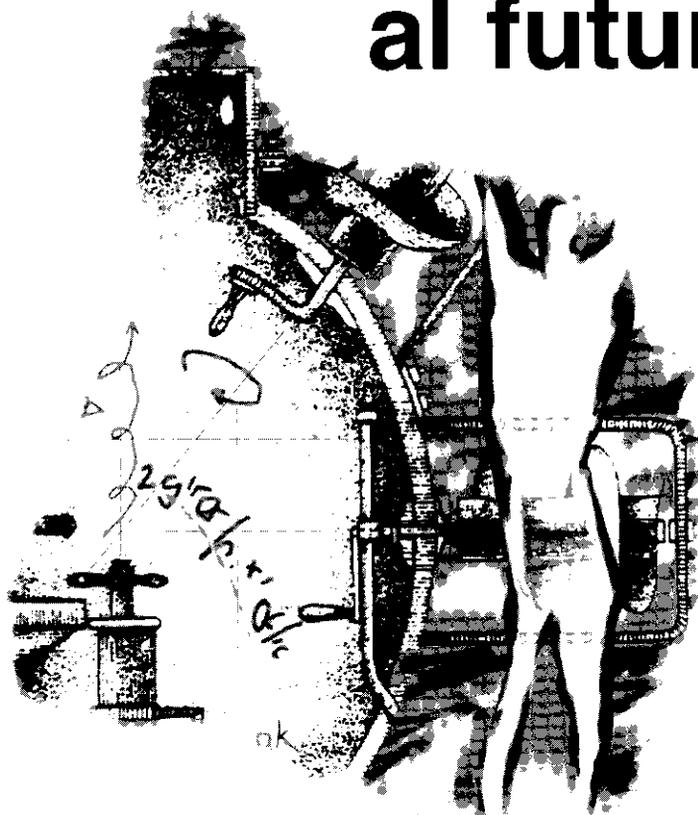
En la Segunda Guerra Mundial, las actividades de investigación operativa se centraban en mejorar la eficacia en el combate de las armas existentes. La disponibilidad de estadísticas operativas contribuyó al éxito de dicho trabajo en dos puntos importantes. Primero, redujo el problema esencialmente a uno de inferencia estadística; y segundo, proporcionó el marco analítico necesario para evaluar la eficacia del armamento en un entorno real de combate. En otras palabras, la investigación operativa se ocupó rigurosamente, o al menos razonablemente, de problemas cuantificables; en la actualidad la situación es más compleja. No hay estadísticas de combate para las armas nuevas, pero durante su desarrollo tienen que tomarse numerosas decisiones.

Muchas de las dudas usuales relativas a la cuantificación y extensión de la teoría por medio de modelos matemáticos se basa en un estándar doble e injusto, como Lanchester señaló hace casi un siglo:

«Hay muchas personas propensas a dudar de cualquier tratamiento matemático o semi-matemático del tema que nos ocupa, basándose en que, debido a los muchos factores desconocidos, tales como la moral o liderazgo de los hombres, las ventajas o desventajas desconocidas de las armas, y la todavía más desconocida "suerte de la guerra", es ridículo pretender calcular cualquier cosa. La respuesta a esta actitud es sencilla: la comparación numérica directa de las fuerzas en conflicto o disponibles en caso de guerra es casi universal. Es un factor que es siempre considerado cuidadosamente por las distintas autoridades militares, y que se discute en la prensa hasta la saciedad. Al mismo tiempo, este recuento directo de fuerzas constituye una aceptación tácita de la aplicabilidad de los principios matemáticos, aunque limitados a un caso especial. Aceptar sin reserva como un valor el mero 'recuento de las piezas', y negar la aplicación más amplia de las matemáticas, es tan ilógico y carente de inteligencia como aceptar en términos generales e indiscriminados la balanza y otras máquinas de pesar como instrumentos de precisión, a la vez que no se permite tener en cuenta las inexactitudes conocidas en su calibración [27].»

5

Enfoque sistémico al futuro



5.1 Introducción

Un número creciente de científicos, dirigentes empresariales, funcionarios del gobierno y otros individuos de todas las profesiones, están haciendo un esfuerzo conjunto para poder comprender y prever los acontecimientos y desastres futuros, tanto sociales como tecnológicos. Existen informes catastrofistas sobre cataclismos globales que casi desafían nuestra comprensión. Estos son algunos augurios típicos de desastre: (1) cambios climáticos que desencadenarán pérdidas masivas de cultivos, sequía y una hambruna generalizada; (2) un mundo que consume y que se contamina, a menos que se pare en seco el crecimiento económico; (3) el planeta regido por una política de selección que salva del hambre solamente a los países en vías de desarrollo que parecen tener posibilidades de supervivencia; etc. En contraste con estos puntos de vista de los seguidores de Malthus, están los que creen en la abundancia: (1) nuevas fuentes de energía virtualmente inagotables; (2) ciudades construidas sobre los océanos; (3) la prolongación de la vida humana; y (4) *cambios importantes en las instituciones sociales e institucionales*, por citar algunos ejemplos.

Las ambigüedades del futuro siempre han intrigado a la humanidad. Sin embargo, hoy en día, el estudio del futuro ha alcanzado un sentido de urgencia y respetabilidad. En primer lugar, en esta era nuclear quizá no haya futuro. En segundo lugar, las profecías ya no están confinadas a la ciencia ficción; muchas universidades ofrecen

ahora cursos futuristas. El que los futuristas no puedan ponerse de acuerdo sobre una visión unificada, probablemente se deba al hecho de que los especialistas en predicción tienen la costumbre de extrapolar desde sus propias experiencias. Esto no quiere decir que deban cesar las tentativas de anticipar el futuro. Todavía tenemos que ir desde aquí hasta allí. Por ejemplo, ¿es mejor concentrar nuestra atención en un objetivo a siglos de distancia, o concentrarnos en obstáculos que probablemente nos encontraremos a corto plazo?

5.2 El diseño del desarrollo sostenible

El enfoque sistémico se caracteriza por la convicción de que el *hombre puede escribir su propio escenario para el futuro*, es decir, que se puede lograr el desarrollo. El desarrollo requiere cambio, y los ingenieros cuyo trabajo consiste en aplicar la tecnología a la sociedad son los principales agentes del cambio. Sin embargo, se requiere un cambio con dirección. El desarrollo tiene que ser planeado, analizado y gestionado.

Sostenemos que el desarrollo es un sistema dinámico, y que todos los problemas de desarrollo que vemos alrededor nuestro, es decir, la congestión, la contaminación, el agotamiento de recursos, la intimidación y la desorganización, no son simples lacras, sino sus resultados. Estas amenazas a la afluencia, la movilidad, las libertades individuales y, quizá, a la supervivencia, son el resultado de un sistema organizado de tal forma que las produce inexorablemente. No son accidentales, ni debidas a error, y *tampoco son debidas a factores externos fuera de nuestro alcance*, como la crisis del petróleo. El mundo es un sistema cerrado que está en conflicto como consecuencia de estructuras, organizaciones y políticas específicas en nuestros procesos de desarrollo.

Hace falta construir escenarios alternativos para una posible intervención del gobierno en los procesos de desarrollo, y en la evaluación de su impacto. El desarrollo de modelos de sistemas, el

tema de esta monografía, es una técnica probada y viable para la creación de escenarios, y que consiste en la exposición de secuencias lógicas de acontecimientos en una relación de sistemas a partir de una situación dada. Los valores asociados con el desarrollo, nuestro objetivo, son: la movilidad social, la flexibilidad tecnológica, las oportunidades económicas y la estabilidad política. Sin embargo, todo esto no es el producto del sistema mundial que hemos creado, y el futuro no es un accidente. Debemos diseñar de nuevo el sistema para producir el desarrollo sostenido como resultado.

La teoría general de sistemas es un pilar del desarrollo porque presenta un punto de vista realista de la causalidad, desglosa las particularidades de las ciencias especializadas, muestra a través de la cibernética cómo todos los sistemas mecánicos, vivos y sociales dependen de la realimentación, y revela cómo el uso de la información es el factor que coordina todos los sistemas. La información es la recíproca negativa del desorden, que comúnmente se denomina entropía. El desarrollo se tiene que encarar de vencer a la entropía mediante la codificación de la información. Al procesar entradas (inputs) de información siempre nuevas, un sistema abierto y resuelto no sólo se adapta sino que es capaz de encontrar nuevos equilibrios. Si aceptamos el doble negativo semánticamente, el desarrollo es la entropía negativa. Es un objetivo difícil, ya que representa el estado menos probable. La contribución de la teoría general de sistemas al desarrollo estriba en dar una visión más amplia sobre cuantos individuos pueden definir un orden apropiado para el mismo. Con el uso de la ingeniería de sistemas, los modelos aún sin formular pueden proporcionar los medios para alcanzar los objetivos que debemos elegir para sobrevivir.

Como en la mayoría de las disciplinas con base científica, la ingeniería de sistemas está experimentando un crecimiento tecnológico explosivo que causa problemas inevitables para los ingenieros, los estudiantes, los investigadores y los profesores. Puesto que la ingeniería de sistemas depende enormemente del estudio de modelos matemáticos que se aproximan a los fenómenos del mundo real, no es sorprendente

que muchos de estos problemas se basen en el uso creciente de conceptos matemáticos y científicos sofisticados. Ahora, más que nunca, es necesario que los ingenieros de sistemas estén formados para aceptar la responsabilidad de utilizar rápidamente las teorías matemáticas y científicas con el fin de conseguir nuevos logros en la ingeniería.

5.3 El proceso del desarrollo de modelos

El análisis de problemas complejos de desarrollo requiere un método para estructurar y organizar el conocimiento de un problema. Las fases más importantes en la construcción de modelos incluyen la definición de los problemas, la conceptualización de los sistemas, la representación, la solución y el uso de los modelos. La definición de los problemas consiste en reconocer que un problema puede ser analizado en términos de sistemas, es decir, que contiene variables que están relacionados causalmente. La conceptualización de sistemas lleva consigo el desarrollo de un diagrama causal, el cual es la muestra visible de las interacciones de las variables. La representación de modelos implica la traducción del diagrama causal a ecuaciones matemáticas. Una vez que exista una exposición matemática precisa de la situación, hay dos maneras básicas para determinar cómo se comportará el modelo: (1) las ecuaciones se pueden resolver analíticamente; y/o (2) las ecuaciones pueden ser resueltas por simulación. En la quinta fase del proceso del desarrollo de modelos, se utiliza el modelo para evaluar las alternativas que se pueden llevar a cabo en el sistema bajo estudio. Aunque es racional, el proceso del desarrollo de modelos no es ordenado; está plagado de falsos comienzos, prueba y error, y muchas iteraciones.

Desarrollar dos versiones del modelo tiene ventajas, una versión básica que se puede resolver analíticamente y una versión perfeccionada que debe ser resuelta con la simulación. La versión básica cubre dos propósitos: es un escalón para desarrollar el modelo de simulación final, y es un medio de comunicar los resultados de las

simulaciones con la expresión de las medidas de efectividad como funciones de las variables de decisión, en vez de tener que depender de la interpretación de los resultados de las simulaciones por ordenador en los que todas las variables se representan gráficamente en función del tiempo.

La simulación de un sistema socioeconómico lleva consigo la construcción y utilización de un modelo diseñado para representar las características del sistema que se consideren significativas en vista de los objetivos de la simulación. Algunos de los objetivos más evidentes de este tipo de simulación son: (1) el pronóstico del macro-comportamiento; (2) la predicción de las macro-consecuencias de acciones gubernamentales alternativas; (3) la realización de estudios de sensibilidad como fuente de orientación para la investigación; y (4) la provisión de ayudas para la enseñanza, la formación, o el logro del entendimiento. Quizá, lo más importante de todo esto es que creemos que el modelo dinámico de simulación que se va a construir liberará a los planificadores del desarrollo de una visión mecánica y determinista de una región, dándoles una herramienta más dinámica y global para influenciar el cambio. Los usos específicos de este modelo incluyen: (1) los medios para hacer efectiva la capacidad de los sistemas; (2) el seguimiento de los progresos durante su ejecución; (3) la formación y evaluación de políticas; (4) la comparación de alternativas estratégicas; y (5) un laboratorio de formación para desarrollar un cuadro de analistas de desarrollo.

5.4 Realización de una capacidad de sistemas

De cara a la complejidad de los problemas de desarrollo y a la amplia gama de conocimientos técnicos multidisciplinarios necesarios para el análisis socioeconómico, se puede considerar que un modelo informático es un mecanismo para extender la percepción de los problemas por parte del usuario, y un marco para ordenar percepciones

dispares y especializadas. Uno de los propósitos de este tipo de modelo es la sistematización del análisis y la planificación regional. La importancia de esto no se puede subestimar, puesto que el mayor obstáculo al diseño del desarrollo inducido por las infraestructuras es la organización de una capacidad local para iniciar, sostener, y llevar a cabo el trabajo.

Una cuestión decisiva en una tarea de desarrollo a gran escala es la siguiente: cómo la ingeniería de sistemas, la planificación de sistemas y el análisis de sistemas pueden utilizarse como herramientas efectivas en la gestión de un programa total y de proyectos individuales. Las medidas iniciales incluyen: (1) la contratación de consultores a corto plazo; (2) la contratación de especialistas; (3) la formación de personal dentro de la organización; (4) la participación en programas de investigación conjuntos con los centros de investigación de las universidades; y (5) una combinación de éstas.

De las alternativas enumeradas arriba, se cree que la primera es la menos aceptable. Es inconcebible que un equipo independiente de consultores, no importa el talento que tengan, pueda preparar en unos pocos meses una metodología para la planificación de sistemas de una región, y describir un procedimiento para los analistas de sistemas de los muchos proyectos en curso. Cada uno de estos proyectos se solapan con muchos de los sectores del desarrollo. Todo esto no puede resultar en la entrega de un informe final a las autoridades locales para su posible ejecución. Es igualmente inconcebible que la ejecución se pudiera lograr con un informe así, incluso si los consultores impartiesen un curso intensivo de ingeniería de sistemas al personal del proyecto. Hay que darse cuenta que la planificación de sistemas y el análisis de una región no es asunto fácil. Idealmente, esto implica la construcción de modelos para describir racionalmente y con precisión las relaciones e interacciones entre varios sectores, el de transporte, el demográfico, el del agua, el de la agricultura, el de la industria, etc.

La ingeniería de sistemas de una región o una nación se debería emprender con la intención de dar continuidad al esfuerzo, y con planes para un desarrollo gradual a largo plazo. La realización se puede lograr combinando la contratación de especialistas con la formación de personal de la organización, y un contrato conjunto de investigación con el centro de investigación de una universidad local. Con respecto a este último punto, se cree firmemente que cuanto mejor entiendan el modelo los que toman decisiones, más probable será que lo utilicen y mejoren su capacidad de tomar decisiones.

5.5 El seguimiento del progreso

El modelo en sí debería convertirse en un mecanismo para el seguimiento del progreso en la fase de ejecución. A medida que los datos de las fases iniciales de la ejecución se hagan disponibles, se puede usar el modelo para realizar mejores pronósticos de lo que sucederá probablemente en fases posteriores. Los modelos están basados en ideas y la mayoría de las ideas sobre el desarrollo regional y el análisis del desarrollo son hipotéticas y subjetivas por naturaleza. El modelo de simulación debería estar basado en datos; es decir, muchas de sus relaciones deberían ser formuladas y probadas con datos reales.

En la discusión sobre el papel que deben jugar los datos en los trabajos de ingeniería de sistemas, es útil distinguir entre la observación y la descripción por un lado, y la interpretación y la teoría por otro. El proceso de observación y descripción se ocupa de la recogida y la ordenación de datos, mientras que la descripción y la teoría se orientan hacia la interpretación y la comprensión del desarrollo como se percibe en una región. Tanto la observación y la descripción, por una parte, como la interpretación y la teoría, por otra, son necesarias: ninguna es suficiente por sí sola.

Algunos creen que el primer paso en una tarea de esta envergadura debe ser la recogida masiva de datos. Otros creen que lo

contrario es cierto, es decir, que el modelo debería venir primero. Realmente, lo que hace falta es un enfoque interactivo. Por ejemplo, ya tenemos la suficiente información descriptiva para empezar con la construcción de modelos muy útiles. Según va evolucionando el modelo y se identifican las variables clave y se definen parámetros útiles, empezamos a discernir cuáles son los datos formales necesarios. La primera interacción en la construcción de modelos nos da idea de la importancia relativa de las numerosas variables, y de la necesidad de obtener información precisa. Muchas veces la información necesaria no existe como «datos», en el sentido usual de información estadística tabulada, especialmente en el caso del análisis regional.

El siguiente paso es realizar el modelo con cantidades que se puedan medir. Con esta información, algunas partes del modelo pueden ser sometidas a unas pruebas más exhaustivas que las que eran posibles con el modelo inicial. Los parámetros y otras características del modelo pueden ser determinados con más precisión. Estas observaciones y descripciones son esenciales para la explicación, porque realmente algo no se comprende hasta que no se puede medir. Asimismo, antes de proceder a medir, deberíamos identificar la variable, elegir una escala de medidas, y saber por qué queremos la información.

Al enfocar el trabajo inicial de la ingeniería de sistemas para el desarrollo de un modelo general de sistemas, se ganará una gran comprensión que ayudará en el eventual desarrollo de un Sistema Informático de Información de Gestión. Este sistema proporcionaría una base de datos completa para el sistema, y serviría de apoyo al personal en el desarrollo de modelos de proyecto individuales, así como en el seguimiento de los mismos.

La importancia del modelo en el diseño final de un Sistema de Información de Gestión, **MIS**, no se puede recalcarlo bastante. Estudios exhaustivos relacionados con el análisis regional, tales como los estudios sobre el uso del suelo, los económicos, demográficos, industriales, de recursos, los estudios sobre el transporte, etc., son caros y llevan mucho

tiempo. Este no es el argumento en contra de la recopilación de una base de datos regional amplia y de alta calidad por dos razones. Lo importante es que, en primer lugar, las decisiones no pueden ser aplazadas indefinidamente, mientras que se recopila y analiza lo último en datos regionales. La presión para el desarrollo es real. En segundo lugar, la experiencia nos dice que nos mantengamos alerta ante programas de recogida masiva de datos que pueden ser de naturaleza expansionista, y al mismo tiempo obsesivos en sus demandas hasta que se convierten en un fin en sí mismos. Es importante explotar las ventajas de la utilización de planes de muestreo pilotos, definidos y diseñados a través del trabajo de desarrollo de modelos, antes de embarcarse en ningún programa de datos a gran escala.

5.6 Predicciones, estrategias y políticas

Creemos que una de las funciones principales del análisis de sistemas es proporcionar conocimientos a los que toman decisiones, relativos a las consecuencias de líneas de acción o inacción alternativas. Las decisiones racionales se basan en predicciones. El analista de sistemas debería poder predecir la dirección de las consecuencias debidas a los cambios en las variables de control, y el retardo de tiempo aproximado entre la aplicación y las consecuencias. También sería muy deseable saber algo acerca de la magnitud de las consecuencias.

Las predicciones obtenidas de un modelo de ordenador están basadas en el conocimiento de las relaciones existentes entre veintenas, o incluso cientos, de variables, obtenidas de la experiencia pasada y presente. El enfoque es metódico y acumula experiencia, formula hipótesis acerca de las relaciones entre las variables, y entonces confronta estas hipótesis con nuevas experiencias (pruebas). Si fuera posible realizar experimentos a escala regional, se harían cambiando intencionadamente algunas variables y observando lo que sucede a otras. Como esto no es posible, la

simulación de la situación se realiza en el ordenador con el modelo del sistema. Sólo a través del modelo, es posible relacionar de una manera válida varias hipótesis relativas a las relaciones entre pares de variables con los efectos causales; esto proporcionará la conexión deseada entre las cosas a predecir y aquéllas otras que se pueden considerar conocidas. El modelo de simulación por ordenador ofrece la oportunidad de poner a prueba cuestiones relativas a las estructuras y la organización, la estrategia y las tácticas, y la política y los procedimientos.

5.7 El laboratorio de formación

El desarrollo de modelos es una herramienta pedagógica; no puede haber duda de que es un área en crecimiento dentro de la educación. El desarrollo de modelos proporciona al usuario un conocimiento intuitivo de la estructura del sistema, con lo que adquiere un papel de actor en vez de espectador. El proceso de construcción de modelos es en sí una herramienta de gran valor para la educación, puesto que pone de manifiesto los principios básicos del sistema bajo examen. Análogamente, la simplificación de un modelo complejo también puede ayudar a revelar lo básico de un proceso específico. El desarrollo de modelos es quizá la única manera de comunicar de forma económica la visión sistemática de un problema.

5.8 Promesa del enfoque sistémico

Hemos llegado finalmente a la desagradable conclusión que la civilización mundial es un sistema que está siendo frenado por su propia ineficacia. El sistema funciona a través de un conjunto de instituciones que eran bastante adecuadas en una era más tranquila. Pero ahora sus tiempos de respuesta ya no se corresponden a la frecuencia de las perturbaciones, y nuestros sistemas a todos los niveles de gobierno están diseñados en realidad para producir salidas desechables.

Cuando el desarrollo, el control de nuestro destino, se considera en términos de sistemas, desaparece parte de la complejidad sorprendente de nuestro mundo, ciudades y regiones. Los objetivos amplios y subjetivos de nuestro desarrollo parecen encontrar significado con el concepto de entropía. Mientras que el desarrollo en este contexto es la maximización de la entropía negativa, esto no es una aplicación de una ley física, sino simplemente un método de razonamiento que nos ayuda a conocer lo que debe hacerse. Debemos diseñar de nuevo nuestras instituciones, porque los distintos conocimientos que se necesitan para gobernar el mundo, una nación, o incluso una gran ciudad, no los posee ningún individuo, ya sea primer ministro, presidente, secretario de partido, gobernador, alcalde, diputado, economista, ingeniero o sacerdote.

Mientras que es posible que los expertos comprendan bastante bien partes de los sistemas de desarrollo, el establecimiento de algunas de las relaciones mutuas que hay entre ellos de una manera internamente consistente es imposible sin recurrir a una técnica formal. Los sistemas de desarrollo están integrados por muchos bucles de realimentación con retardos, efectos no lineales, y ruido en los canales de comunicación, por lo que su comportamiento no puede preverse estudiando porciones aisladas de forma secuencial. Estas dificultades se multiplican cuando es preciso considerar la formulación de las políticas y sus impactos.

Si hemos de relacionar entre sí e interpretar nuestras observaciones del proceso de desarrollo, necesitaremos una estructura integradora. En la actualidad, la técnica política óptima se puede describir como una mezcla de fragmentos de observaciones hechas por expertos muy especializados que no se comunican entre sí, y por las intuiciones políticas convencionales de los burócratas. Nuestra hipótesis es que la ingeniería de sistemas puede hacer lo mismo para los problemas de desarrollo que lo que ha hecho para los sistemas industriales: elaborar una teoría de sistemas tan general y tan equilibrada como para tener una amplia aplicación en el proceso. Si se acepta esta hipótesis, entonces

la dinámica del desarrollo proporcionará un marco conceptual muy deseable para llevar a cabo lo siguiente: (1) superar las barreras artificiales que separan los distintos sectores del desarrollo, transporte, agricultura, industria, etc.; (2) tratar los problemas que van desde el nivel hombre-máquina, hasta el nivel del sistema S-T-E-P (social-tecnológico-económico-político); y (3) transmitir a los profesionales, educadores y estudiantes una mayor capacidad de comunicación interdisciplinar. La premisa es que existe un núcleo común de elementos, principios, variables controladas, variables sin controlar, objetivos y estrategias que están presentes en todos los problemas que son independientes de geografía, cultura, economía y dogma.

Con nuestros conocimientos, es perfectamente posible mejorar nuestros modelos mentales para análisis y planificación. Quizá el obstáculo mayor para la aplicación del enfoque sistémico a la gestión del futuro es la enajenación actual que existe contra la ciencia y la tecnología. Ningún sistema físico para guiar el destino de miles de personas, y con un costo de miles de millones de dólares, se debería diseñar sin desarrollar primero un modelo del mismo. No obstante, se planifican, diseñan y operan sistemas de desarrollo continuamente, sin que se lleven a cabo pruebas de sus posibles consecuencias.

Deben establecerse instituciones experimentales para realizar pruebas de decisiones políticas, las cuales pueden considerarse como software, del mismo modo que tenemos laboratorios para llevar a cabo ensayos del hardware. Para esto sólo se precisa un equipo reducido y ninguna clase de burocracia.

5.9 Epílogo

En último término, cualquier estrategia global para un desarrollo sostenido depende de la capacidad de las universidades para formar un cuerpo grande y diverso de científicos de sistemas sociales-tecnológicos; algunos de estos deben ser capaces de trabajar en las

mismas fronteras de las distintas disciplinas, otros deben ser formados y motivados para funcionar en equipos interdisciplinarios organizados para atacar alguno de los múltiples problemas de la sociedad. Sugerimos que el estudio de la ingeniería de sistemas y su aplicación a los problemas de desarrollo en las universidades debe seguir un marco similar al presentado en esta monografía.

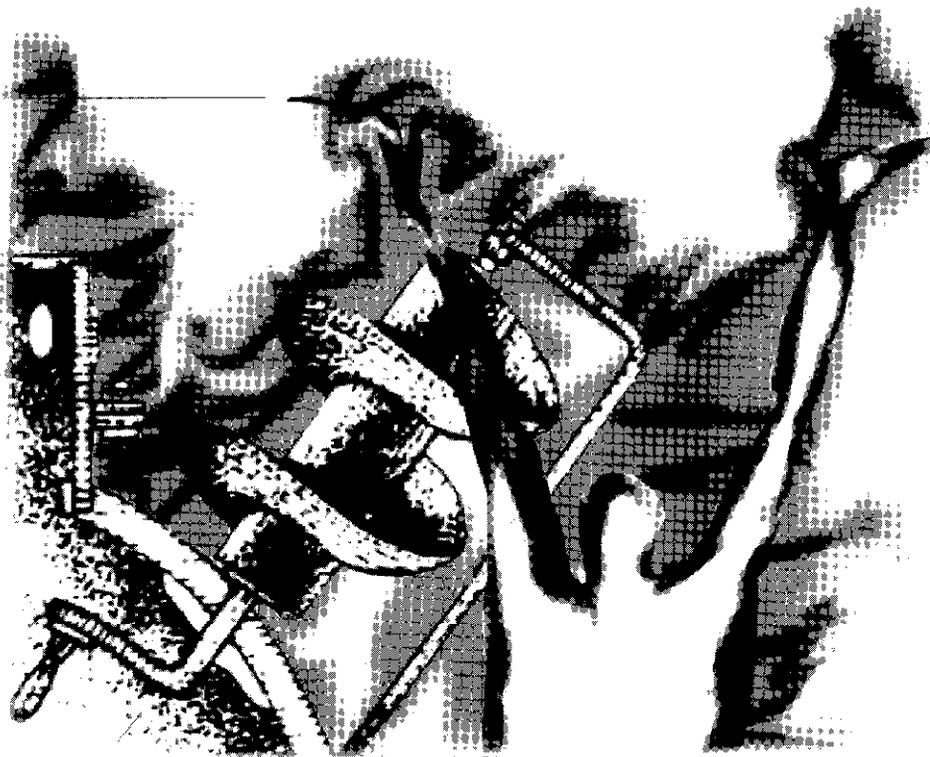
El ingeniero de sistemas sabe que su labor no es predecir el futuro, sino hacerlo posible. El desarrollo de escenarios en los que se usan diagramas causales y modelos matemáticos no consiste en predecir el futuro, sino en describir el presente con una comprensión tal que podamos: (1) describir el futuro que deseamos a partir de todos los otros objetivos del desarrollo; y (2) decidir como lo lograremos (el proceso de desarrollo).

El enfoque sistémico aplicable al desarrollo sostenido es un método experimental. Implica experimentar con distintas políticas, antes de que sean puestas en práctica, en vez de experimentarlas sobre una nación y descubrir al cabo de veinte años que eran políticas equivocadas. El uso del enfoque sistémico para representar los problemas del desarrollo tiene una consecuencia importante. Supone el fin de la inocencia, ya que un modelo formal y lógico es más fácil de criticar que algo más difuso como pueda ser un programa político.

El enfoque sistémico aplicado al desarrollo requiere contribuciones de los científicos. No obstante, esto no constituye una tecnocracia, del mismo modo que tampoco constituye anarquía el solicitar las opiniones de los ciudadanos en general. Definimos un tecnócrata como un técnico determinista que cree que hay soluciones técnicas para todos los problemas. Esto está en contradicción directa con la hipótesis en la que se basa esta monografía, es decir, que no hay soluciones puramente tecnológicas a los problemas del desarrollo contemporáneo. A estos les llamamos problemas S-T-E-P porque poseen elementos sociales, económicos y políticos, además de tecnológicos. No hay estrategias puras para resolverlos, sólo mixtas.

Tenemos la opción de combinar las cuestiones sociales, tecnológicas, económicas y políticas y, mediante la ingeniería de sistemas, podemos enfrentarnos con consideraciones de este tipo con la misma rapidez con que podamos reflexionar sobre los problemas e identificar las relaciones importantes.

Referencias



[1] Forrester, J. W., Principles of Systems, Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Massachusetts, 1968.

[2] Roberts, R. B., System Dynamics - An Introduction, Managerial Applications of System Dynamics, ed. by R. B. Roberts, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1978.

[3] Forrester, J. W., Industrial Dynamics, Productivity Press, Inc., Portland, Oregon, 1961.

[4] Espejo, R., What is Systems Thinking?, System Dynamics Review, Vol. 10, No. 3, 1994.

[5] Richmond, B., Systems Thinking/Systems Dynamics, System Dynamics Review, Vol. 10, No. 3, 1994.

[6] Forrester, J. W., Market Growth as Influenced by Capital Investment, Collected Papers of Jay W. Forrester, Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Massachusetts, 1975.

[7] Wolstenholme, E. F., A Systematic Approach to Model Creation, Modeling For Learning Organizations, ed. by J. Morecroft and J. Steman, Productivity Press, Portland, Oregon, 1994.

[8] Drew, D. R., System Dynamics: Modeling and Applications, Virginia Tech, Blacksburg, VA.

[9] Drew, D. R. and C. Hsieh, A Systems View of Development: Methodology of Systems Engineering and Management, Cheng Yang Publishing Co., Taipei, 1984.

[10] Drew, D. R., The Growth Shapers: Infrastructure Induced Development, Systems Models for Decision Making Chapter 5, ed. by N. Sharif and P. Abulbhan, Asian Institute of Technology, Bangkok, May 1978.

[11] Drew, D. R., Transportation Impact Methodology for Measuring User and Non-user Benefits, Proceedings of the 1991 International Systems Dynamics Conference, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1991.

[12] Drew, D. R., Transportation and Economic Development: Overview of Methodology, Transportation Research Record No. 1274, Washington, D.C., 1990.

[13] Drew, D. R., A. S. Al-Dawood, and D. Brugh, Modeling Transportation and Economic Development at Regional Level, Mid-Atlantic Universities Transportation Center, University Park, PA 16802, 1990.

[14] Drew, D. R., Modeling Infrastructure Induced Development at National and Regional Levels, Proceeding International System Dynamics Conference, Stirling, Scotland, July 1994.

[15] Drew, D. R., System Dynamics Model of Infrastructure Development on Taiwan, Proceedings of the System Dynamics Society, M.I.T., Cambridge, Massachusetts, 1987.

[16] Drew, D. R. and N. Lewi, Simulation Model of Ethiopia, Modeling and Simulation, Vol. 19, Univ. of Pittsburgh, 1975.

[17] Drew, D. R. et al., Bicol River Basin Development Program Computer Simulation Model, U.S. A.I.D. Final Report, Manila, Philippines, 1975.

[18] Drew, D. R., Modeling Infrastructure Induced Socioeconomic and Environmental Change, Proceedings of the 1993 International Congress on Modeling and Simulation, Univ. of Western Australia, Perth, Australia, 1993.

[19] Drew, D. R., System Dynamics Vis-a-Vis Other Methods for Modeling Land Use, Transportation and Economic Development, Seminar presented at Lund Institute of Technology, May 31, 1994.

[20] Iwasaki, H., System Dynamics Model of Socioeconomic Development in Japan, Thesis, Virginia Tech, 1993.

[21] Forrester, J. W., World Dynamics, Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Massachusetts, 1971.

[22] Meadows, D. H., D. L. Meadows, J. Randers and W. W. Behrens III, The Limits of Growth, Universe Books, New York, 1972.

[23] Randers, J. and D. L. Meadows, The Dynamics of Solid Waste Generation, Toward Global Equilibrium: Collected Papers, ed. by D. L. Meadows and D. H. Meadows, Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Massachusetts, 1973.

[24] Meadows, D. L., D. H. Meadows, J. Randers and W. W. Behrens III, Dynamics of Growth in a Finite World, Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Massachusetts, 1974.

[25] Leontief, W. W., The World Economy of the Year 2000, Economic Development, Scientific American, W. H. Freeman and Co., San Francisco, 1980.

[26] In Our Own Backyard, Studies in Infrastructure Technology and Policy, Building Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1993.

[27] Lanchester, F., Aircraft in Warfare, Constable Publishing Co., London, 1916.

[28] Drew, D. R. and A. A. Trani, Helicopter Technology/Survivability Assessment Methodology, presented to the U.S. Army Materiel Command, Washington, D.C., August 10, 1987.

[29] Drew, D. R. and A. A. Trani, Carrier Air Defense Tradeoff Model (CADTM), presented to the U.S. Center for Naval Analyses, Washington, July 1988.

[30] Thompson, J. R., Empirical Model Building, John Wiley & Sons, New York, 1989.

[31] Braun, M. Differential Equations and Their Applications, Springer-Verlag, New York, 1983.

[32] Kuhlman, N., M. Linn, M. Miller and C. Roberts, Supply Management, Industrial College of the Armed Forces, Washington, 1974.

[33] Standard Industrial Classification Manual, Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

[34] National Income and Product Accounts (Special Supplement), U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C., 1981.

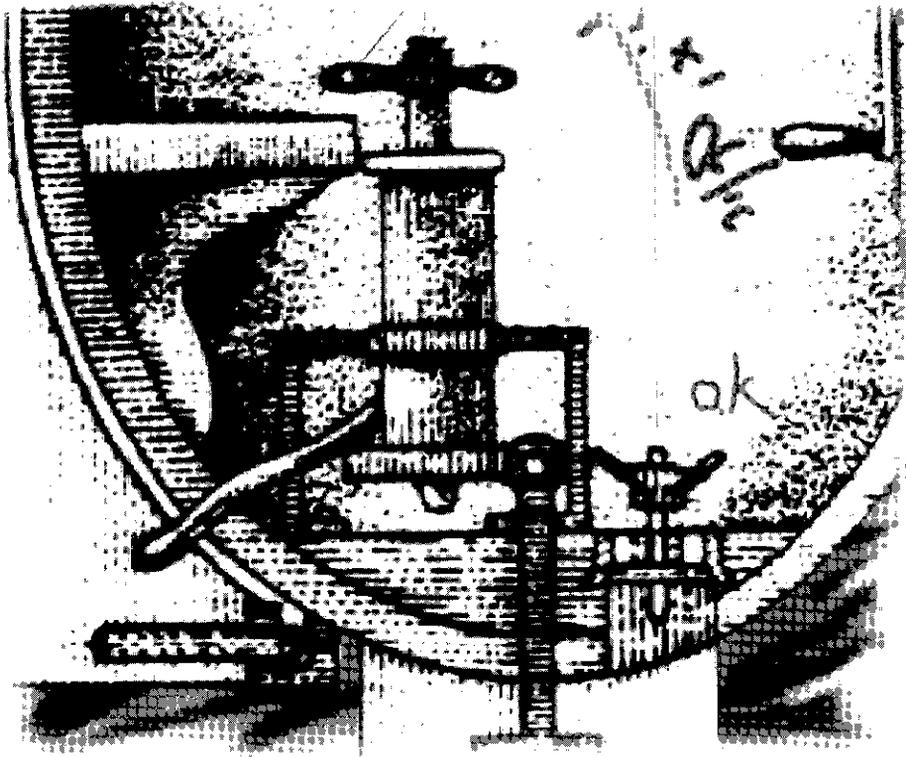
[35] Almanac of Business and Industrial Financial Ratios, Prentice-hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1979 Edition.

[36] Economic Report of the President, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1982.

[37] Moussavi, M., Managing Aircraft Survivability and Technological Substitution in National Security Planning, Doctoral Dissertation, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 1984.

[38] Hitch, C. and R. McKean, Elements of Defense Economics, National Defense University, Washington, D.C., 1977.

Bibliografía



- Ackoff, R. L.:** *Science in the Systems Age: Beyond IE, OR and MS.* Operations Research, May-June 1973.
- Alfeld, L. & K. Graham:** *Introduction to Urban Dynamics.* Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Mass., 1975.
- Asby, W.:** *An Introduction to Cybernetics.* Chapman and Hall, London, 1950.
- von Bertalanffy, L.:** *General System Theory.* George Braziller, New York, 1968.
- Black, G.:** *Systems Analysis in Government Operations.* Management Systems, Ed. by R. P. Schoderbek, John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- Blalock, H.:** *Theory Construction.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1969.
- Blanchard, B. S.:** *Systems Engineering Management.* John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.
- Blanchard, B. S. & W. J. Fabrycky:** *Systems Engineering and Analysis.* 2^a Edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1990.
- Blunden, W. R.:** *The Land-Use/Transport System.* Pergamon Press, Sydney, Australia, 1971.
- Boulding, K. E.:** *General Systems Theory - The Skeleton of Science.* Quantitative Disciplines in Management Decisions, Ed. by Levin, R. I., Dickenson Publ. Co., Belmont, Calif., 1969.
- Branch, M. C.:** *- Delusions And Diffusions of City Planning in the United States.* Management Science, Vol. 16, No. 12, August 1970.
- Planning - Aspects and Applications.** John Wiley Sons, Inc., New York, 1966.
- Brown, G. S.:** *Engineering and Societal Software - A New Imperative.* Technology Review, Vol. 75, No. 3, M.I.T., Cambridge, Mass., January 1973.
- Carnap, R.:** *Introduction to Symbolic Logic and Its Applications.* Dover Publications, Inc., New York, 1964.
- Catanese, A. J. & A. W. Steiss:** *Systematic Planning Theory and Application.* D. C. Heath and Co., Lexington, Mass., 1970.
- Chadwick, G.:** *Systems View of Planning.* Pergamon Press, Sydney, Australia, 1971.
- Chiristakis, A. N.:** *The Limits of Systems Analysis in Economic and Social Development Planning.* *Ekistics*, Vol. 34, No. 200, July 1972.
- Chokey, N. H.:** *Feedback and Stability.* Operations Research and Systems Engineering, The John Hopkins Press, Baltimore, 1970 (Ch. 23)

-
- Churchman, C. W.,
R. L. Ackoff &
E. L. Arnof:** *Analysis of the Organization,*
Management Systems, Ed. by P. P. Shoderbek, John Wiley &
Sons, Inc., 1971.
- Churchman, C. W.:** *The Systems Approach,*
Delacorte Press, New York, 1968.
- Commoner, B.:** *The Environmental Cost of Economic Growth,*
Energy, Economic Growth, and the Environment, Ed. by S. H.
Schurr, The John Hopkins Press, Baltimore, 1972.
- Di Stefano, J. J.,
A.R. Stubberud &
I.J. Williams:** *Feedback and Control Systems,*
Ed. by P. P. Schoderbek, John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- Dixon, J. R.:** *Design Engineering,*
McGraw-Hill Book Co., New York, 1966.
- Doxiadis, C. A.:** *An Introduction to the Science of Human Settlements,*
Hutchinson Press, London, 1969.
- Drew, D. R.:** - *Application of Multilevel Systems Theory to Freeway Control,*
Systems Approach and the City, Ed. by mesarovic/Reisman, N.
Holland Publishing Co., Amsterdam, Holland, November 1972.
- *Systems Management: A General View in Developing Countries,*
Decision Models for Industrial Systems Engineers and Managers,
Ed. by P. Adulbhan and M. Tabucanon, A.I.T. Press, Asian
Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1980.
- *The Growth Shapers: Infrastructure Induced Development,*
Systems Models for Decision Making, Ed. by N. Sharif and P.
Adulbhan, A. I. T. Press, Asian Institute of Technology, Bangkok,
Thailand, 1978.
- *A Systems View of Development: Methodology of Systems
Engineering and Management,*
Cheng Yang Publishing Co., No. 4, Lane 20, Gong-Yuan Road,
Taipei, R.O.C., 1984.
- *Systems Management: A General Overview,*
Publicado en tres partes: Parte I «The Underlying Concepts and
Approaches»; Parte II «System Dynamics Modeling»; Parte III
«Lebanon's Reconstruction and Development»; publicado en
DYNAMICA, Vol. 7, Partes 2, 3 y 4, 1971.
- *A System Dynamics Model for Managing Aircraft Survivability,*
The 1983 International System Dynamics Conference, M.I.T., July 1983.
- Drew, D. R.,
M. S. Moussavi &
I. B. Santoso:** *Systems Dynamics and Conventional Approaches for Managing
Technological Substitution in National Security Planning,*
Winter Simulation Conference 1983, Vol. 2, IEEE, New York, 1983.
- Drew, D. R.,
I. B. Santoso,
M. S. Moussavi &
S. H. Young:** *Quantitative Methods for Assessing U.S. Tactical Air Power Effectiveness,*
American Institute for Decision Sciences Proceedings, ed. by R.
G. Flood, College of William and Mary, Williamsburg, VA, 1984.
-

- Drew, D. R.,
T. K. Tran &
S. H. Young:** *System Dynamics Combat Aircraft Attrition Models*,
Proceedings 15th Annual Conference on Modeling and Simulation,
Univ. of Pittsburgh, April 1984.
- Drew, D. R.,
M. S. Moussavi,
T. K. Tran &
S. H. Young:** *Simulation Model for Peacetime Combat Aircraft Buildups*,
Proc. 15th Annual Conf. on Modeling and Simulation, Univ. of
Pittsburgh, April 1984.
- Drew, D. R.,
I. B. Santoso,
T. K. Tran &
S. H. Young:** *A Simulation Model for Assessing U.S. Combat Aircraft Effectiveness*,
Proc. 15th Annual Conf. on Modeling and Simulation, Univ. of
Pittsburgh, April 1984.
- Drew, D. R.,
T. K. Tran,
S. H. Young &
M. H. Tant:** *Combat Aircraft Vulnerability/Susceptibility Management Model*,
Proceedings 15th Annual Conference of Modeling and Simulation,
Univ. of Pittsburgh, April 1984.
- Drew, D. R.,
T. K. Tran &
A. A. Trani:** *Aircraft Performance Considerations in Conceptual Design*,
Modeling and Simulation Vol. 17, Univ. of Pittsburgh, April 1986.
- Drew, D. R.,
V. R. Kadari &
T. K. Tran:** *Survivability Lethality Tradeoff Submodel for Advanced Tactical Aircraft*,
Modeling and Simulation Vol. 17, Univ. of Pittsburgh, April 1986.
- Drew, D. R.,
T. K. Tran &
L. A. Malakhoff:** *Aircraft/Threat Combat Interactions Methodology*,
Modeling and Simulation, Vol. 17, Univ. of Pittsburgh, April 1986.
- Drew, D. R.,
S. K. Sathisan &
M. S. Moussavi:** *Survivability Tradeoff Analysis Models*,
Modeling and Simulation, Vol. 17, Univ. of Pittsburgh, April 1986.
- Drew, D. R. &
A. A. Trani:** *Air-to-Air Combat Simulation Model*,
Modeling and Simulation, Vol. 18, Univ. of Pittsburgh, May 1987.
- Drew, D. R. &
L. A. Malakhoff:** *Air Superiority Mission Tradeoff Methodology*,
Modeling and Simulation, Vol. 18, Univ. of Pittsburgh, May 1987.
- Drew, D. R. &
A. A. Trani:** *Air-to-Ground Combat Simulation Model*,
Modeling and Simulation, Vol. 19, Univ. of Pittsburgh, May 1988.
- Drew, D. R. &
L. A. Malakhoff:** *Carrier-Based Aircraft Simulation Model*,
Modeling and Simulation, Vol. 19, Univ. of Pittsburgh, May 1988.
-

-
- Drew, D. R.,
A. A. Trani &
L. A. Malakhoff:** *Systems Dynamics Modeling of Air Warfare*,
presented at the International Conference of the System Dynamics Society
the Stuttgart University, Germany, Julio 11-14, 1989. Proceedings of the
System Dynamics Society, M.I.T., Cambridge, MA, 1989.
- Drucker, P. F.:** *Technology Management and Society*,
William Heine-mann Ltd., London, 1970.
- Elkan, W.:** *An introduction to Development Economics*,
Penguin Books Ltd., Middlesex, England, 1973.
- Ellis, D. O. &
F. J. Ludwig:** *Systems Philosophy*,
Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1962.
- English, J. M.:** *Some Investment Concepts in Engineering Systems with Particular
Emphasis on Long Range Investment*,
Economics of Engineering and Social Systems, Ed. by J. M.
English, John Wiley & Sons, New York.
- Forrester, J. W.:** - *Industrial Dynamics*,
The M. I. T. Press, Cambridge, Mass., 1961.
- *Principles of Systems*,
Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Mass., 1968.
- *Industrial Dynamics*,
The M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1971.
- *Urban Dynamics*,
The M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1971.
- *World Dynamics*,
Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Mass., 1971.
- *The Life Cycle of Economic Development*,
Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Mass., 1972.
- Frederiksen, H.:** *Feedbacks in Economic and Demographic Transition*,
Global Systems Dynamics, Ed. by E. O. Attinger, John Wiley &
Sons, Inc., New York, 1970.
- Fuller, R. B.:** *Education for Comprehensivity*,
Approaching the Benign Environment, University of Alabama
Press, 1970.
- Furnas, C. C. &
J. McCarthy:** *The Engineer*,
Life Science Library, Time, Inc., New York, 1966.
- Goode, H. H. &
R. E. Machol:** *System Engineering: An Introduction to the Design of Large-Scale
Systems*,
McGraw-Hill Book Co., New York, 1957.
- Gosling, W.:** *The Design of Engineering Systems*,
John Wiley & Sons, Inc., New York, 1962.
-

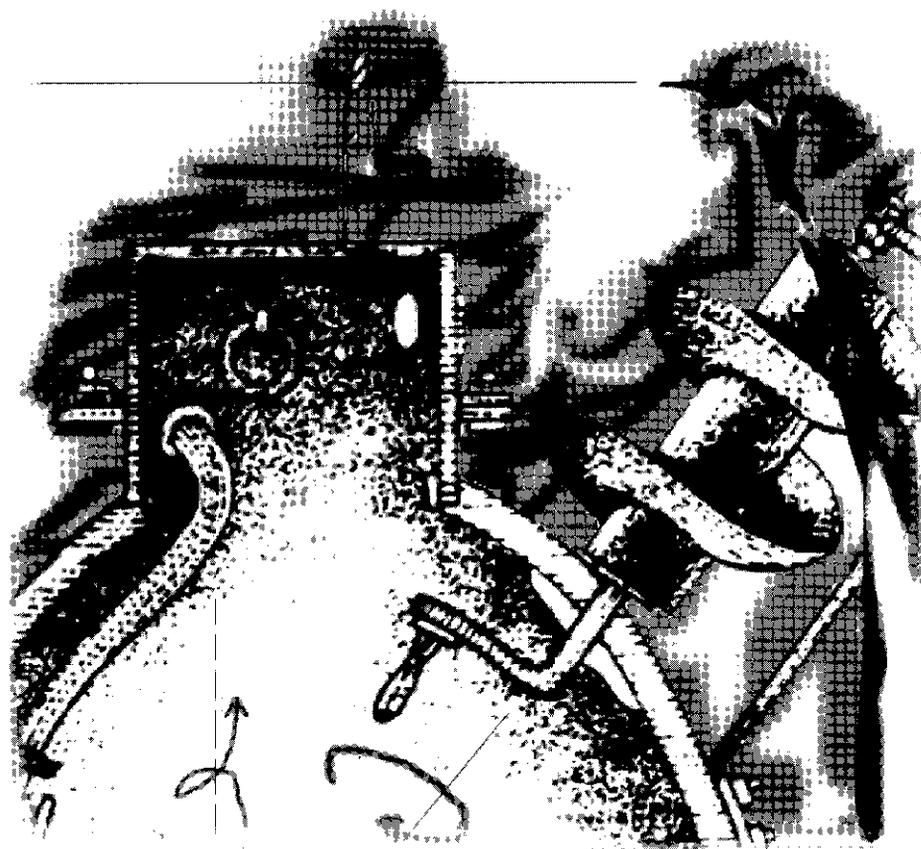
-
- Hall, A. D.:** - *A Methodology for System Engineering*,
D. Van Nostrand Co., Princeton, N.J., 1962.
- «*Military Technology*»,
A History of Technology, Vol. II, Ed. by C. Singer, E. Holmyard, A.
Hall, y T. Williams, Oxford University Press, Ely House, London W.
1, 1967.
- Hamilton, H. R.,
S. E. Goldstone,
J. W. Milliman,
A. L. Pugh,
E. B. Roberts &
A. Zellner:** *Systems Simulation for Regional Analysis: An Application to River
Planning*,
The M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1969.
- Hare, V. C.:** *Systems Analysis: A Diagnostic Approach*,
Harcourt, Brace, & World, Inc., New York, 1967.
- Heller, W. W.:** *On Economic Growth*,
Energy, Economic Growth, and the Environment, Ed. by S.
H. Schurr, The John Hopkins Press, Baltimore, 1973.
- Hillier, F. S. &
G. J. Lieberman:** *Introduction to Operations Research*,
Holden-Day, Inc., San Francisco, 1968.
- Hirsch, W. Z.:** *Input-Output Techniques for Urban Government Decisions*,
University of California, Los Angeles, 1968.
- Hoos, I. R.:** *Systems Analysis in Public Policy*,
University of California Press, Berkeley, Calif., 1972.
- Hopeman, R. J.:** *System Analysis and Operations Management*,
C. E. Merrill Publishing Co., Columbus, Ohio, 1969.
- Huggins, W. H.:** *Flow-Graph Representation of Systems*,
Operations Research and Systems Engineering, The John Hopkins
Press, Baltimore, 1960 (Ch. 21).
- Hughes, H. K.:** *Cybernetics and the Management of Large Systems*,
Global Systems Dynamics, Ed. by E. O. Attinger, S. Karger, New
York, 1970.
- Jenkins, G. M. &
P. V. Youle:** *Systems Engineering: A Unifying Approach in Industry and Society*,
C. A. Watts & Co., Ltd., London, 1971.
- Jutila, S. T.:** *Dynamic Modeling of Regional and Interregional Macro-economic
Development*,
Department of Operations Analysis, The University of Toledo, Ohio,
1973.
- Kalecki, M.:** *A Macrodynamic Theory of Business Cycles*,
Econometrica, Vol. 3, 1955.
- Karp, R. M.:** *Some Topics in Graph Theory*,
Foundations of Information Systems Engineering, Engg. Summer
Conferences, Univ. of Mich., 1967.
- Kemeny, J. G.:** *Man Viewed as a Machines*,
Mathematical Thinking in the Behavioral Sciences, Readings from
the Scientific American, Ed. by W. H. Freeman & Co., San
Francisco, 1968.
-

-
- Killian, J. R., Jr.:** *Toward a Working Partnership of the Sciences and Humanities, Approaching the Benign Environment*, University of Alabama Press, 1970.
- Klir, J. K.:** *An Approach to General Systems Theory*, Van Nostrand Reinhold Co., 1969.
- Lazer, W.:** *Marketing Management a Systems Perspective*, John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- Lee, A. M.:** *Systems Analysis Frameworks*, The Macmillan Co., New York, 1974.
- Leontief, W.:** *Input-Output Economics*, Oxford Univ. Press, Fair Lawn, N.J., 1966.
- Lewis, L. J.,
D. K. Reynolds,
R. Bergseth &
F. J. Alexandaro:** *Linear Systems Analysis*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1969
- Machol, R. F.:** *Methodology of Systems Engineering*, System Engineering Handbook, Ed. by R. E. Machol, McGraw-Hill Book Co., New York, 1965.
- Mason, S. J.:** *Feedback Theory - Some Properties of Signal Flow Graphs*, Proc. Inst. Radio Engrs., New York, 41, 1144-1156, 1953.
- Mass, N. J.:** *Readings in Urban Dynamics: Vol. I*, Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, 1974.
- McLoughlin, J. G.:** *Urban and Regional Planning - A Systems Approach*, Faber and Faber Ltd., London, 1972.
- Meadows, D.:** *Community Production Cycle Model*, Study Notes in System Dynamics, by M. R. Goodman, Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Mass., 1974.
- Meadows, D. H.,
D. L. Meadows,
J. Randers &
W. W. Behrens III:** *The Limits to Growth*, Universe Books, New York, 1972.
- Meadows, D. L.,
Meadows, D. H.,
J. Randers &
W. W. Behrens III:** *Dynamics of Growth in a Finite World*, Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Mass., 1974.
- Mesarovic, M. D.:** *Foundations for a General Systems Theory*, Views on General Systems Theory, Ed. by M. D. Mesarovic, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1964.
- Mesarovic, M. &
E. Pestel:** *Mankind at the Turning Point*, The New American Library, Inc., Bergenfield, N.J. 07621, 1974.
- Naylor, T. H.:** *Systems Research in Organization and Management: A Systems Analysis Approach to Population Control*, Global Systems Dynamics, Ed. by E. O. Attinger, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1970.
-

-
- O'Brien, M. P.:** *The Engineering of Large Systems*,
The World of Engineering, Ed. by J. R. Whinnery, McGraw-Hill,
New York, 1965.
- Peterson, W. W.:** *Error-Correcting Codes*,
Mathematical Thinking in Behavioral Sciences, Readings from
Scientific American, W. H. Freeman and Co., San Francisco, 1968.
- Pierce, J. R.:** *Symbols, Signals, and Noise: The Nature and Process of
Communication*,
Harper and Row Publishers, New York, 1961.
- Pugh, A. L. III:** *Dynamo II User's Manual*,
The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts
- Randers, J. &
D. L. Meadows:** *The Dynamics of Solid Waste Generation*,
Toward Global Equilibrium: Collected Papers, Ed. by D. L.
Meadows and D. H. Meadows, Wright-Allen Press, Inc.,
Cambridge, Massachusetts, 1973.
- Raven, F. H.:** *Automatic Control Engineering*,
McGraw-Hill Book Co., New York, 1961.
- Roberts, F. S.:** *Signed Digraphs and the Growing Demand for Energy*,
Environment and Planning, Vol. 3, pp. 395-410, 1971.
- Rosenstein, A. B.,
R. R. Rathbone &
W. F. Sohneerer:** *Engineering Communications*,
Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1964
- Schoderbek, P. P.:** *Prologue to the Future*,
Management Systems, Ed. by Schoderbek, John Wiley & Sons,
Inc., 1971.
- Schroeder, W.
K. Sweeney &
L. Alfeld:** *Readings in Urban Dynamics: Vol. 2*,
Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Massachusetts, 1975.
- Stasch, S. F.:** *Systems Analysis for Marketing Planning and Control*,
Scott, Foresman & Co., Glenview, Illinois, 1972.
- Susskind, C.:** *Understanding Technology*,
The John Hopkins Press, Baltimore, 1973.
- Takahashi, Y.
M. J. Rabins &
D. M. Auslander:** *Control and Dynamic Systems*,
Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, 1970.
- Timms, H. L.:** *Introduction to Operations Management*,
Richard D. Irwin, Inc., Homewood, Illinois, 1967.
- Trani, A. A.:** *Combat Aircraft Scenario Tradeoff Models for Conceptual Design
Evaluation*,
Doctoral Dissertation, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, 1988.
- Tustin, A.:** *Feedback*,
Mathematical Thinking in the Behavioral Sciences, Readings from
the Scientific American, W. h. Freeman & Co., San Francisco,
1968 (Ch. 10).
-

-
- Walker, E. A.:** *Engineers and Nature's Future*,
Approaching the Benign Environment, University of Alabama
Press, 1970.
- Weiner, N.:** *Cybernetics*,
Mathematical Thinking in Behavioral Sciences, Readings from
Scientific American, W. H. Freeman & Co., San Francisco, 1968.
- Weldon, R. J.:** *The Concept of a System*,
The Journal of Systems Engineering, Vol. 1, No. 1, January 1969.
- Wilson W. E.:** *Concepts of Engineering System Design*,
McGraw-Hill Book Co., New York, 1965.
- Wilts, C. H.:** *Principles of Feedback Control*,
Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Massachusetts, 1960.
- Wright, S.:** *The Method of Path Coefficients*,
Annals of Mathematical Statistics, (Vol. 5, pp. 161-215), 1934.
- Wymore, A. W.:** *A Mathematical Theory of Systems Engineering - The Elements*,
John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.
-
-

Glosario



1. **ALTERNATIVAS.** Los medios con los que se pueden conseguir los objetivos. En un modelo, se ponen de manifiesto como flujos causales que relacionan las variables de decisión con las medidas de eficacia.
 2. **DISPONIBILIDAD.** Es la probabilidad de que un sistema esté funcionando satisfactoriamente en cualquier instante, cuando se utiliza bajo condiciones especificadas.
 3. **CAJA NEGRA.** Un mecanismo o sistema desconocido, y a veces imposible de conocer, cuyo funcionamiento se juzga únicamente observando sus entradas y salidas.
 4. **ORDENADOR.** Una máquina capaz de aceptar información, de aplicarle procesos predeterminados, y proporcionar los resultados de estos procesos.
 5. **CRITERIO.** Una prueba de preferencia necesaria para establecer la elección de una alternativa como preferible a otra. Cada alternativa compara la medida en que se alcanzan los objetivos con los costes y los recursos utilizados.
 6. **DESARROLLO (EL OBJETIVO).** Un estado de entropía mínima, tipificado por la movilidad social, la flexibilidad tecnológica, la oportunidad económica y la estabilidad política.
-

7. DESARROLLO (EL PROCESO). El proceso a través del cual la sociedad se esfuerza por alcanzar un mayor control sobre su entorno y sobre el destino de su pueblo, y también para reducir su vulnerabilidad a influencias exteriores, tanto naturales como causadas por el hombre; todo ello a través de un uso más eficaz de los recursos y conseguido gracias a un conjunto de cambios posibles, económicos, tecnológicos, sociales y políticos.

8. ECONOMETRÍA. La rama de la economía en la que se utilizan las matemáticas y la estadística para construir y analizar modelos económicos, con el fin de explicar fenómenos económicos y de estimar valores de variables económicas. Los métodos estadísticos utilizados han sido desarrollados especialmente para tratar datos de series temporales.

9. CRECIMIENTO ECONÓMICO. El crecimiento sostenido de la producción total y per cápita de un país, medido por su producto nacional bruto y por otras estadísticas de producción.

10. PREVISIÓN. Un intento de definir cursos posibles de acontecimientos futuros.

11. TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS. Mientras que la teoría de sistemas trata de las relaciones entre los elementos de un sistema, la teoría general de sistemas se ocupa de las relaciones entre distintas disciplinas con el fin de llegar a un método unificado para la formulación de problemas fundamentales.

12. PRODUCTO NACIONAL BRUTO. El valor total del mercado de todos los bienes y servicios producidos por la economía de una nación durante un año.

13. ANÁLISIS DE ENTRADAS Y SALIDAS (INPUT-OUTPUT). Un estudio cuantitativo de la interdependencia de un grupo de actividades, basado en la relación entre las entradas y las salidas de

las mismas. La herramienta básica de análisis es un modelo de interacción, con una tabla cuadrática de entradas-salidas, para un período determinado, con lo que se muestra simultáneamente para cada actividad el valor de las entradas y de las salidas, así como el valor de las transacciones correspondientes a cada actividad. Ha sido aplicado a la economía y a las «industrias en que puede dividirse la economía».

14. INFRAESTRUCTURA. La base de la economía de una nación, región o comunidad (sistemas de transportes y comunicaciones, instalaciones energéticas, recursos de agua y sistemas de distribución, etc.).

15. ITERATIVO. Describe un procedimiento o proceso en el que se ejecutan de forma repetida un conjunto de operaciones hasta que se alcanza alguna condición. Un procedimiento iterativo puede realizarse por medio de un bucle en una rutina.

16. BUCLE. Una serie autocontenida de instrucciones en la que la última instrucción se puede modificar y repetir a sí misma, hasta que se alcanza una condición final, que ocurre cuando los procesos causales se cierran sobre sí mismos.

17. MANTENIBILIDAD. La probabilidad de que, cuando se inicia una acción de mantenimiento bajo condiciones prescritas, un sistema inutilizado puede ser restaurado a una condición operativa en un período de tiempo total especificado.

18. MODELO MATEMÁTICO. La caracterización general de un proceso, objeto o concepto, por medio de símbolos matemáticos, que permite una manipulación relativamente sencilla de las variables, con el fin de determinar cómo el proceso, objeto o concepto se comportaría bajo distintas situaciones.

19. MISIÓN. La tarea o responsabilidad específica que una persona o grupo de personas tienen asignadas para su realización.

20. MODELO. Una representación simplificada de la realidad donde se incluyen sólo los aspectos más importantes del problema bajo estudio. Su representación puede variar desde un conjunto de ecuaciones matemáticas o un programa de ordenador, hasta una descripción puramente verbal de la situación. En el análisis de coste/eficacia (o cualquier análisis de decisiones), el papel del modelo es la predicción de los costes de cada alternativa y el grado en que cada una lograría el objetivo.

21. CUANTIFICAR. Calificar con respecto a la cantidad. En el desarrollo de modelos esto consiste en traducir las relaciones físicas observadas en relaciones matemáticas análogas.

22. FIABILIDAD. La probabilidad de que un sistema, subsistema o equipo realice una función requerida bajo condiciones especificadas.

23. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO. Investigación básica y aplicada en las ciencias e ingeniería, y el diseño y desarrollo de prototipos y procesos.

24. ESCENARIO. Una representación verbal de una secuencia fija de acontecimientos en un entorno definido.

25. SIMULACIÓN. La representación de sistemas y fenómenos físicos por medio de ordenadores, modelos u otros equipos. El modelo o la representación con el ordenador se manipula para imitar aspectos significativos de una situación. Básicamente, es un medio para resolver un modelo matemático, empleado generalmente cuando no puede obtenerse una solución analítica.

26. SUPERVIVENCIA. La capacidad de un sistema para resistir un entorno hostil hecho por el hombre, sin que sufra una disminución importante en su capacidad para resolver su misión designada.

27. SISTEMA. Un conjunto de elementos interconectados entre sí, cuya estructura determina todos los modos posibles del «comportamiento» del sistema.

28. ANÁLISIS DE SISTEMAS. La descripción de sistemas en función de las relaciones causales entre sus elementos, de modo que el funcionamiento del sistema pueda predecirse para los distintos cambios de sus características. Estimación de las consecuencias en el tiempo de políticas, programas y proyectos alternativos con relación a sus objetivos múltiples especificados de antemano.

29. ENFOQUE SISTÉMICO. El arte de examinar el contexto global en el que va a funcionar el elemento en estudio.

30. COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS. El comportamiento de las variables del sistema en el tiempo, incluidos el equilibrio y los comportamientos exponenciales, asintóticos, oscilatorios, crecimiento en forma de S, crecimiento seguido de oscilaciones, y crecimiento y colapso.

31. DISEÑO DE SISTEMAS. La creación de un sistema de ingeniería en el que se requiere la aceptación de responsabilidad por la ingeniería durante el ciclo de vida, incluidos la planificación, el ajuste, el desarrollo, la producción, la prueba y la asignación.

32. DINÁMICA DE SISTEMAS. Una metodología desarrollada por J. Forrester del Instituto Tecnológico de Massachusetts, relacionada con la simulación de un sistema concebido como una red de flujos y bucles de realimentación, que interconectan varios inventarios o niveles que responden a los cambios en el sistema debidos a decisiones o índices de variación.

33. INGENIERÍA DE SISTEMAS. Resolución de problemas complejos en los que interviene la tecnología en el contexto de la sociedad de la que forman parte, por medio del análisis de sistemas,

diseño de sistemas, investigación de sistemas y administración y planificación de sistemas.

34. ADMINISTRACIÓN DE SISTEMAS. La formulación y realización de políticas en sistemas de decisión, por medio de las cuales los flujos de entrada de información obtenidos a partir de las observaciones en un sistema funcional se convierten en decisiones para controlar las salidas funcionales del sistema.

35. METODOLOGÍA DE SISTEMAS. Un método versátil y reproducible para conceptualizar metaproblemas como sistemas, en el que se emplean herramientas para construir modelos de los sistemas y técnicas para obtener soluciones de los mismos.

36. PLANIFICACION DE SISTEMAS. Planificación estratégica y completa, en contraste con la planificación táctica de proyectos, en la que se requiere la especificación de los objetivos del sistema, la generación de alternativas y la evaluación de las salidas del sistema para cada alternativa, en función de los objetivos y de acuerdo con ciertos criterios.

37. INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS. La determinación de la función de transferencia para un sistema, es decir, las teorías y leyes científicas por medio de las cuales las entradas del sistema se convierten en salidas.

38. ESTRUCTURA DE SISTEMAS. El número, disposición, polaridad y orden de los bucles de realimentación.

39. TÁCTICA. El empleo de unidades en combate. La disposición y maniobras ordenadas de las unidades en coordinación mutua, y/o en relación con el enemigo con el fin de utilizar todas sus potencialidades.

40. OBJETIVO. En el contexto militar, un área geográfica, un complejo o instalación que se prevé capturar o destruir por fuerzas enemigas.

41. JUEGO DE GUERRA. Una simulación por cualquier medio de una operación militar en la que intervienen dos o más fuerzas opuestas, llevada a cabo usando reglas, datos y procedimientos designados para representar una situación real objetiva o supuesta.

*Esta primera edición de
DINÁMICA DE SISTEMAS APLICADA
de la serie de
Monografías de Ingeniería de Sistemas
se terminó de imprimir el día
30 de abril de 1995.*

COMITÉ DE REDACCIÓN

Presidente

Sr. D. Martín Aleñar Ginard

Teniente General (R) del Ejército de Tierra

Vocales

Sr. D. Eduardo Avanzini Blanco

General de Brigada Ingeniero del Ejército del Aire

Sr. D. Manuel Bautista Pérez

Director General del Instituto Nacional de Meteorología

Sr. D. Carlos Casajús Díaz

Vicealmirante Ingeniero de la Armada

Sr. D. Luis García Pascual

Director de las Escuelas de Ingeniería del ICAI

Sr. D. Ricardo Torrón Durán

General de Brigada Ingeniero del Ejército de Tierra

Sr D. Alberto Sols Rodríguez-Candela

Ingeniero de Sistemas. Isdefe

Sra. Dña. M^a Fernanda Ruiz de Azcárate Varela

Imagen Corporativa. Isdefe

Otros títulos publicados:

1. Ingeniería de Sistemas. *Benjamin S. Blanchard.*
2. La Teoría General de Sistemas. *Ángel A. Sarabia.*
3. Dinámica de Sistemas. *Javier Aracil.*



Isdefe

Ingeniería de Sistemas

c/ Edison, 4
28006 Madrid
Teléfono (34-1) 411 50 11
Fax (34-1) 411 47 03
E-mail: monografias@isdefe.es

P.V.P.: 1.000 Ptas.
(IVA incluido)