

1
207

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingenieria

OPERACION OPTIMA DE UN SISTEMA HIDRAULICO

FORMADO POR DOS PRESAS EN PARALELO

ROBERTO TADEO REBOLLEDO SILVERA

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE

POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER

EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA

(APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS)

CIUDAD UNIVERSITARIA

DICIEMBRE 1990

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

OPERACION OPTIMA DE UN SISTEMA HIDRAULICO
FORMADO POR DOS PRESAS EN PARALELO

INDICE

	Pág.
1. INTRODUCCION	4
1.1 <i>Generalidades</i>	
1.2 <i>Objetivos</i>	
2. CONSIDERACIONES SOBRE ANALISIS DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	11
2.1 <i>Concepto de sistema</i>	
2.2 <i>Clasificación de los sistemas</i>	
2.3 <i>Sistemas de aprovechamientos hidráulicos</i>	
2.4 <i>Análisis de los sistemas de aprovechamientos hidráulicos</i>	
2.5 <i>Técnicas de optimización usadas en aprovechamientos hidráulicos</i>	
2.5.1 <i>Programación lineal</i>	
2.5.2 <i>Programación no lineal</i>	
2.5.3 <i>Programación dinámica</i>	
3. POLITICA DE OPERACION A LARGO PLAZO EN PRESAS DE ALMACENAMIENTO	29
3.1 <i>Planteamiento de la problemática</i>	
3.2 <i>Beneficios y costos generados</i>	

3.3	<i>Funcionamiento de una presa de almacenamiento</i>	
3.4	<i>Función objetivo</i>	
3.5	<i>Método de solución con programación dinámica</i>	
3.6	<i>Ventajas y desventajas del método</i>	
4.	POLITICA DE OPERACION CONJUNTA A LARGO PLAZO DE SISTEMAS COMPLEJOS DE ALMACENAMIENTO.	67
4.1	<i>El sistema hidráulico de dos presas de almacenamiento</i>	
4.2	<i>La operación del sistema hidráulico presa-acuífero</i>	
4.3	<i>Antecedentes</i>	
4.4	<i>Esquema económico de costos y beneficios netos considerados</i>	
4.5	<i>Modelo de asignación de agua estacional</i>	
4.6	<i>Aplicación de la programación dinámica estocástica al problema de dos presas en paralelo</i>	
5.	EJEMPLOS DE APLICACION	90
5.1	<i>Política de operación de un sistema hipotético de dos presas que abastecen a un distrito de riego</i>	
5.2	<i>Aplicación a un caso real</i>	
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
7.	REFERENCIAS	120

8.1 *Diagrama de bloques del método*

8.2 *Programa de cómputo "OPTIMII" para determinar políticas de operación conjunta en dos presas de almacenamiento*

8.2.1 *Diagrama de bloques*

8.2.2 *Programa principal y subrutinas*

8.2.3 *Entrada de datos y salida de resultados*

8.2.4 *Limitaciones y/o restricciones*

8.2.5 *Listado del programa fuente*

1. INTRODUCCION

1.1 GENERALIDADES

El abastecimiento de agua en sus diferentes usos, doméstico, agrícola e industrial, atraviesa actualmente momentos críticos, originados primordialmente en el crecimiento poblacional e industrial. Aunado a ello se tiene en diversos casos una distribución espacial y temporal deficiente del recurso. Es así que para poder abastecer del líquido a las grandes urbes se hace necesario importarla desde cuencas lejanas, incrementando sustancialmente con ello, los costos de transporte ; ejemplo claro de ello se tiene en el sistema de abastecimiento de agua de la ciudad de México, el cual se constituye por un complejo sistema hidráulico, que maneja el agua desde fuentes superficiales y subterráneas.

En cuanto a la distribución temporal del recurso, se hace necesario utilizar obras de infraestructura hidráulica que permitan adecuar un régimen particular de oferta al de la correspondiente demanda. Para ello, con referencia al aprovechamiento de aguas superficiales, se diseñan y construyen presas de almacenamiento, siendo una de sus funciones conciliar ambos rubros, es decir, adecuar el régimen fluvial de una corriente al de utilización por parte de los usuarios.

El estudiar y utilizar fuentes de abastecimiento superficiales, presenta entre las ventajas principales las siguientes:

- . Son fácilmente identificables
- . Los muestreos de agua necesarios son de fácil ejecución
- . La información para su análisis es muy accesible

Como desventaja cabe señalar el alto costo de almacenar y regular los escurrimientos de un río, ya que aprovecharlos implica la construcción de grandes obras hidráulicas, muchas de ellas de gran valor monetario y ocasionalmente de tipo social cuando, por ejemplo, se requiere desalojar zonas pobladas que están ubicadas dentro del área de inundación del vaso de una presa.

Por otro lado, el uso de fuentes subterráneas se ve favorecido en situaciones de disponibilidad adecuada del recurso, presentando entre otras las siguientes ventajas:

. Mejor distribución espacial del recurso; esto redunda en menores costos de conducción hasta la zona de demanda.

. Buena calidad del agua. En muchos casos no se requiere tratamiento, o solo de tipo primario.

. El almacenamiento es natural, no requiere de obras de infraestructura tan costosas como es el caso de la cortina, vertedor y obra de toma de una presa de almacenamiento.

. La dispersión de contaminantes es lenta, lo cual se debe a las características del medio saturado.

Como desventaja vale la pena mencionar la dificultad en la obtención de información y en la identificación de zonas con potencial de extracción, lo cual hace difícil llevar estudios geohidrológicos a altos grados de conocimiento y en el mejor de los casos estos tienen el elevado grado de incertidumbre asociado a los datos utilizados.

La situación más real es la combinación de ambos tipos de fuente, en cuyo caso se cuenta con un sistema hidráulico que puede estar constituido por presas de regulación y almacenamiento, redes de líneas de conducción y a superficie libre, plantas de bombeo, baterías de pozos de extracción, etc. En todos los casos las obras se dimensionan considerando las leyes demanda particulares, además de los volúmenes disponibles, tanto a nivel superficial como subterráneo.

En el diseño de las obras se revisa el funcionamiento hidráulico del

sistema frente a diversas alternativas de configuración del mismo, seleccionando de esta manera aquella que se considere está más cerca de los objetivos propuestos y con el menor costo asociado. Es posible que durante la vida útil de las obras se vean modificadas las condiciones inicialmente consideradas de demanda, climatológicas e inclusive las del tipo político y social; por ello, en esos casos es necesario revisarlas y modificar de la mejor forma posible sus condiciones de funcionamiento. No llevar a cabo estas acciones puede redituar en bajos rendimientos, paralelamente con algunas consecuencias, que se describen a continuación.

Con respecto a las aguas superficiales, particularmente en una presa de almacenamiento, no es deseable que se presenten las siguientes situaciones:

- . Altos volúmenes de evaporación
- . Altos volúmenes de derrame
- . Déficit en los volúmenes de entrega (en el sector agrícola llegan inclusive a ocasionar la pérdida de cosechas y en el abastecimiento de agua potable a poblaciones, los fuertes racionamientos implican un mal servicio al usuario).

En aguas subterráneas se pueden mencionar las siguientes inconvenientes:

. Pérdida de terrenos de cultivo por salinización de los suelos agrícolas como consecuencia de tener niveles de almacenamiento demasiado elevados en el acuífero (almacén de agua subterránea).

. Sobreexplotación de la fuente, a consecuencia de un volumen de bombeo o extracción, mayor a la recarga natural del acuífero.

. Uso deficiente del equipo de bombeo, creando régimen transitorio indeseable en zonas aledañas y por tanto el correspondiente daño a la estructura misma del pozo de explotación.

En términos generales se puede decir que un mal manejo de un sistema hidráulico conlleva un bajo porcentaje de aprovechamiento de una cuenca superficial o subterránea, según sea el caso; siendo necesario implantar una *"política de operación"* que mejore su funcionamiento y al mismo tiempo incremente los beneficios económicos y sociales esperados del sistema.

Antes de seguir adelante, se hace indispensable definir brevemente el concepto *"política de operación"*; bajo este término se engloban los lineamientos a seguir en el manejo de un sistema hidráulico, simple o complejo, de acuerdo con las denominadas variables de estado (p.e nivel de almacenamiento en la presa o en el acuífero) y las variables de decisión (p.e el volumen de extracción) incluidas en el proceso. Con respecto a este tópico, en capítulos posteriores se reafirmará y

extenderá en el campo de la ingeniería de los aprovechamientos hidráulicos.

1.2 OBJETIVOS

Los objetivos básicos que se pretenden cubrir en el desarrollo de esta tesis son los siguientes:

. Enmarcar dentro de la ingeniería de sistemas los problemas de operación de un sistema de aprovechamientos hidráulicos, en particular se trata el de dos presas en paralelo, haciendo algunas extrapolaciones hacia el sistema presa-acuífero.

. Describir el procedimiento de obtención de políticas de operación, bajo el esquema de programación dinámica estocástica tanto en una presa de almacenamiento individual como en sistemas complejos.

. Desarrollar e implementar la herramienta de cómputo indispensable para abordar y resolver problemas del tipo mencionado.

Para cubrir los objetivos propuestos se han desarrollado 6 capítulos cuyo contenido general se menciona a continuación:

En el capítulo 2 se describe la problemática de los sistemas de aprovechamientos hidráulicos dentro del campo de análisis de la ingeniería de sistemas. Este capítulo tiene también por objetivo introducir al lector interesado, en las técnicas de optimización de mayor difusión dentro de esta área de la hidráulica.

En el tercer capítulo se describe y analiza una de las metodologías alternativas en la determinación de políticas de operación a largo plazo en presas de almacenamiento. Se hacen también comentarios con respecto a las simplificaciones y limitaciones de las estructuras analíticas disponibles.

El cuarto capítulo describe una forma de atacar el problema que plantea la operación de dos presas en paralelo, específicamente se utiliza programación dinámica estocástica; se hacen algunos comentarios para hacer su extensión al abordar el sistema combinado de aguas superficiales y subterráneas (presa-acuífero).

En el quinto capítulo se aplica la metodología base de esta tesis a un sistema de presas hipotético y a un caso real de manejo de aguas superficiales y subterráneas.

Finalmente en el sexto capítulo se consignan las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

2. CONSIDERACIONES SOBRE ANALISIS DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS

2.1 CONCEPTO DE SISTEMA

En primera instancia vale la pena destacar que no existe al respecto un concepto universal; el mayormente aceptado se refiere a un sistema como un conjunto de componentes interrelacionados y coordinados, que llevan a cabo una función de acuerdo con objetivos y metas predeterminadas.

2.2 CLASIFICACION DE SISTEMAS

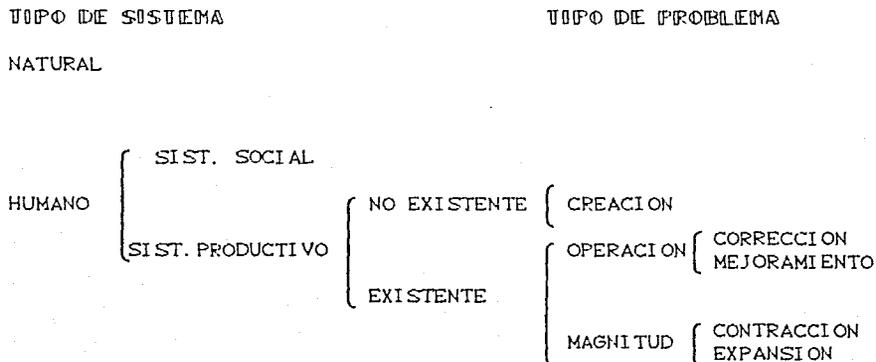
Al igual que con el concepto de sistema, existen diversas clasificaciones dadas por diversos autores; dentro de la literatura especializada del tema, tiene gran aceptación el dividir los sistemas en dos grandes grupos ⁽⁴⁾: sistemas naturales y sistemas humanos . Los

naturales son aquellos creados por la naturaleza, entre estos se pueden mencionar el ciclo hidrológico, el sistema de drenaje natural de una cuenca, el sistema solar, etc. Los sistemas humanos son los creados por el hombre, entre otros: el drenaje pluvial urbano, el sistema de transporte, el sistema social y político, etc. En los del primer tipo, en sentido estricto, el hombre es un observador que los estudia a través de las diversas disciplinas científicas. En los del segundo tipo es en donde sí interviene fundamentalmente en su creación y continuo estudio de su comportamiento.

Los sistemas humanos pueden ser subdivididos a su vez en sistemas sociales y sistemas productivos; en los segundos cobran una mayor importancia los elementos físicos, a diferencia de los primeros, en los cuales se establecen las normas del comportamiento del hombre en sociedad. El objetivo básico de los sistemas productivos es el de satisfacer las necesidades materiales del hombre, a través de elementos humanos, físicos y mecánicos, correlacionados armónicamente hacia el logro de los objetivos.

El sistema productivo, en primera instancia debe ser creado; ya creado y en la etapa de operación, es posible que puedan presentarse problemas de operación o de magnitud. La operación obviamente puede ser corregida o mejorada con base en el análisis de su comportamiento. Los problemas de magnitud son de contracción o de expansión y se presentan muy comunmente en los estudios de mercado.

En el siguiente cuadro se sintetiza la información descrita:



2.3 SISTEMAS DE APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS

Con base en los incisos anteriores, se puede definir un sistema de aprovechamientos hidráulicos⁽²⁾ como cualquier intervención humana encaminada hacia el aprovechamiento de los recursos hidráulicos disponibles, con objeto de satisfacer las necesidades humanas en materia de aguas, con base en lo cual puede ser clasificado como un sistema humano productivo. Este trabajo se enfoca hacia sistemas ya existentes y que por tanto presentan usualmente problemas de tipo operacional.

Un ejemplo muy simple de un sistema de aprovechamiento hidráulico lo constituye un canal para desviar las aguas de un río con objeto de

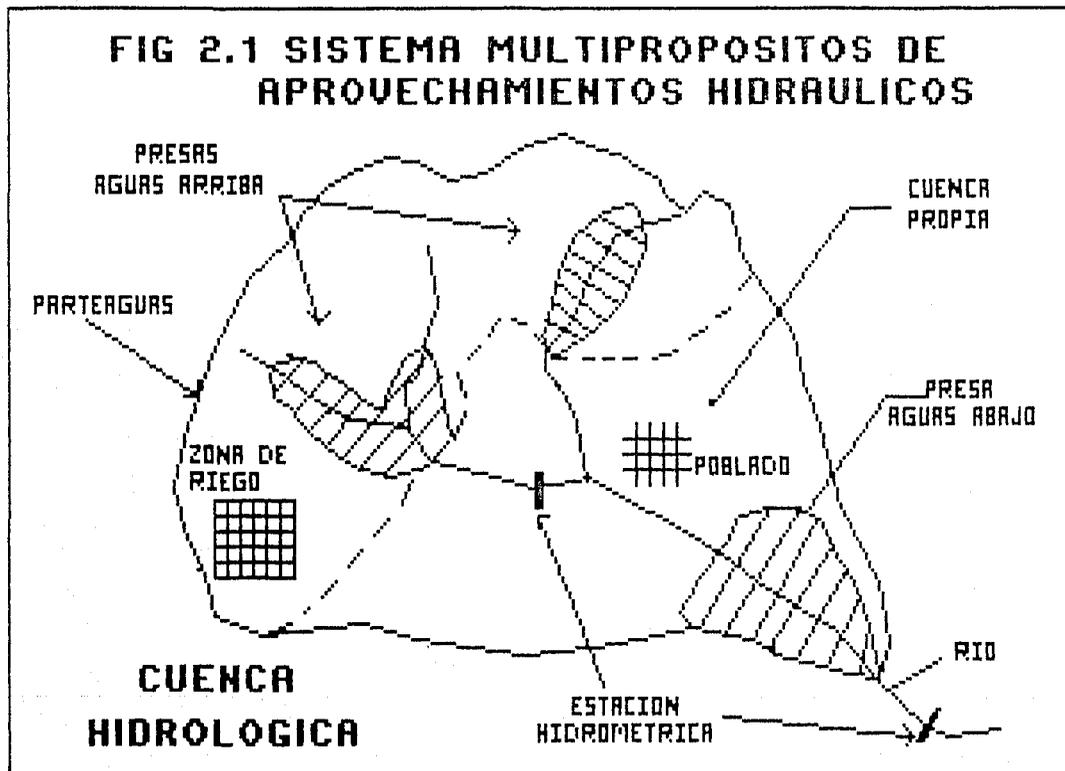
regar un campo de cultivos. Más complejo es un sistema de presas, canales y pozos de extracción de aguas subterráneas, construido para abastecer de agua potable a una población urbana; inclusive puede pensarse en un sistema de aprovechamientos hidráulicos con objetivos múltiples, que contemple además generación hidroeléctrica y riego agrícola. El uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas representa un sistema adecuado a los problemas actuales que se atraviesan a nivel mundial en el suministro de agua; concretamente en el sistema presa-acuífero es de primordial importancia controlar los problemas inherentes a su operación. En la figura 2.1 se esquematiza un sistema complejo con propósitos de control de avenidas, suministro de agua potable y para riego agrícola.

2.4 ANALISIS DE SISTEMAS DE APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS

Descrita la problemática, es necesaria una herramienta técnica que permita abordarla y determinar la mejor solución considerando aquellos componentes del sistema cuyo comportamiento pueda ser estudiado con detalle por las diversas ramas de la ciencia.

En la gran mayoría de los casos, sobre todo en sistemas complejos, se hace necesario tomar en cuenta las distintas interrelaciones entre sus componentes y los distintos problemas interdisciplinarios. Una rama desarrollada para tomar decisiones en estos sistemas y concretamente en los de tipo hidráulico, se denomina "*Análisis de Sistemas de Aprovechamientos Hidráulicos*".

FIG 2.1 SISTEMA MULTIPROPOSITOS DE APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS



El propósito central del análisis de sistemas de aprovechamientos es contribuir en la toma de decisiones y resolver algunos problemas que de esta se derivan; por ejemplo en muchos casos es necesario el mejoramiento de las normas en la generación de la información necesaria.

A continuación se describen los pasos que contempla el análisis de sistemas, haciendo énfasis en los aprovechamientos hidráulicos:

a) Identificación de componentes

Identificar cada componente del sistema de aprovechamientos hidráulicos analizado. Si se considera el sistema de dos presas en paralelo desde el punto de vista oferta-demanda; la oferta se constituye por los almacenamientos de agua logrados mediante la construcción de las cortinas de las presas; el rubro demanda corresponde a la zona de riego, urbana o industrial a la cual servirá el sistema. En términos generales los elementos del sistema que forman la oferta y la demanda se ajustan en tiempo y espacio de acuerdo con las denominadas "medidas de diseño", las que se refieren a las capacidades de los componentes.

b) Identificación de objetivos

Establecer claramente los objetivos técnicos, sociales, políticos, económicos o de otra índole que estén relacionados con el problema. Es

así como en aprovechamientos hidráulicos, muchas veces se requiere maximizar las ganancias económicas esperadas del funcionamiento del sistema; cabe mencionar que en muchas ocasiones este objetivo va en contra de algunos de tipo político o social.

c) Generación de opciones

Establecer las posibles opciones que permitan alcanzar los objetivos. El análisis de sistemas, por medio de las técnicas de optimización, genera opciones de solución a un problema planteado, dichas opciones son reglas o normas de funcionamiento propuestas para operar un sistema de aprovechamientos. Es válido utilizar el término *política de operación* cuando a cada una de las variables de decisión se le ha asignado un valor particular, este conjunto de decisiones resultante es el que constituye en sí una política.

d) Evaluación de opciones

Valorar los posibles resultados que se tendrían en caso de implantar cada una de las opciones generadas en el paso anterior. Para cubrir esta fase es necesario utilizar técnicas de simulación que reflejen la tendencia de las variables frente a la opción de solución. Es así como en una presa de almacenamiento es indispensable simular su posible funcionamiento, tomando en cuenta una política de operación generada. En un acuífero se simula el comportamiento del flujo subterráneo, discretizando para ello el medio continuo.

e) Presentación de resultados y toma de decisiones

Seleccionar y evaluar el curso de acción a seguir, esto es, efectuar la toma de decisiones. En el caso que ocupa esta tesis, se refiere a seleccionar la mejor política de operación del sistema que cubra los objetivos preestablecidos.

Es importante comprender que las técnicas de análisis de sistemas de recursos hidráulicos, no proporcionan la respuesta a todos los problemas; existen algunos de gran escala en los cuales es difícil aplicar métodos de optimización, en estos casos los resultados pueden ser engañosos o mal interpretados.

2.5 TECNICAS DE OPTIMIZACION

Las técnicas de optimización forman parte de los llamados modelos de programación matemática y constituyen la herramienta fundamental para el análisis de sistemas de recursos hidráulicos. En este inciso se describe la estructura de las más usuales en esta área de la ingeniería; se contempla: programación lineal, programación no lineal y programación dinámica. No se abordan a fondo los esquemas de solución; en su lugar se remite al lector interesado a las referencias especializadas en el tema, descritas en el capítulo 7.

2.5.1 PROGRAMACION LINEAL

Esta técnica es utilizada en aprovechamientos hidráulicos fundamentalmente en la asignación de recursos escasos. Su concepción facilitó el desarrollo de otras técnicas como la teoría de redes, la programación entera y la programación no lineal.

El esquema de la programación lineal⁽⁶⁾ consiste en la maximización o minimización de una función lineal de varias variables sujeta a restricciones lineales en estas mismas variables. La forma compacta y usual de describirla es:

optimizar (maximizar o minimizar) la función:

$$Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j$$

sujeta a:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} b_i \quad i=1,2,\dots,m$$

$$X_j \geq 0$$

Comunmente se le da la siguiente interpretación:

Existen n actividades que incluyen los recursos limitados b_1, b_2, \dots, b_m . La actividad j consume unitariamente a_{ij} unidades del recurso i , proporcionando un beneficio unitario C_j . El objetivo es encontrar el

valor X_j de cada actividad j , que proporciona el máximo beneficio.

Para proceder a aplicar algunos de los algoritmos de solución, se requiere sistematizar el cálculo, esto es, convertir las restricciones en igualdades y los términos independientes, b_j , se hacen positivos, para los cual se utilizan variables artificiales cuando la restricción original es del tipo mayor o igual (\geq), y variables de holgura cuando es del tipo menor o igual (\leq).

El planteamiento final o forma estándar queda:

$$\max \quad Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j$$

sujeta a:

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} X_j = b_i \quad i=1,2,\dots,m$$

$$X_j \geq 0$$

desarrollando las expresiones de la forma estándar:

$$\max Z = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n$$

sujeto a:

$$P_{11} X_1 + P_{12} X_2 + P_{13} X_3 + \dots + P_{1n} X_n = b_1$$

$$P_{21} X_1 + P_{22} X_2 + P_{23} X_3 + \dots + P_{2n} X_n = b_2$$

...

$$P_{m1} X_1 + P_{m2} X_2 + P_{m3} X_3 + \dots + P_{mn} X_n = b_m$$

$$X_1, X_2, \dots, X_n \geq 0$$

Los coeficientes p_{ij} , b_i y C_j son números reales y X_i , $i=1,2,\dots,n$ son las variables a determinar.

Si el problema está correctamente planteado, debe ocurrir que $n > m$, ya que $n = m$ indica que solo hay un punto factible; si $n < m$, existen restricciones redundantes o dependencia lineal entre ellas.

El algoritmo de solución SIMPLEX ^[3], desarrollado en 1947, aprovecha

dos propiedades muy importantes que se consignan en los dos siguientes teoremas.

Teorema 1: La solución, si existe, está asociada a un punto extremo (intersección) del espacio de soluciones.

Teorema 2: No importa el número de variables, la solución solo contiene m de ellas diferentes de cero.

Actualmente se realizan esfuerzos encaminados a la aplicación de las técnicas de programación lineal con probabilidades restringidas, para determinar políticas de operación en presas de almacenamiento⁽⁴⁾, aprovechando establecer restricciones que eviten situaciones no deseables; otro caso para el cual es aplicable este concepto es el desbordamiento de la cortina de una presa⁽⁵⁾.

2.5.2 PROGRAMACION NO LINEAL

La función a optimizar en este caso es no lineal de varias variables, planteada en general como:

Se buscan los valores

$$X_1, X_2, \dots, X_n$$

que hagan mínima la función

$$Z(X_1, X_2, \dots, X_n) = f_1(X_1, X_2, \dots, X_n) + \dots + f_m(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Z se compone de m funciones no lineales, f , en n variables.

Resolver el problema no resulta sencillo ya que la mayoría de los métodos conducen a óptimos locales y no globales. El enfoque más utilizado parte de la base de una revisión del entorno de una solución propuesta, moviéndose entonces en la dirección que presenta mayor decrecimiento de la función objetivo y estableciendo originalmente un tamaño de paso que puede ser modificado posteriormente.

En el mínimo, las derivadas parciales de la función Z con respecto a las variables X_1, X_2, \dots, X_n se anulan, por lo tanto es posible aprovechar esta propiedad para resolver el problema, planteando un sistema de ecuaciones de la forma:

$$\frac{\partial Z}{\partial X_1} = 0, \quad \frac{\partial Z}{\partial X_2} = 0, \quad \dots, \quad \frac{\partial Z}{\partial X_n} = 0$$

Este procedimiento resulta ideal en casos sencillos, como por ejemplo ajustes por mínimos cuadrados, o de funciones de distribución de probabilidad; no así en otros casos más complicados en los cuales solo se llega a óptimos locales.

La mayoría de los métodos desarrollados para buscar la solución a estos problemas, se basan en la selección de una dirección de avance por etapa, para posteriormente simplificar la búsqueda a una sola

dimensión. En términos generales se procede de la siguiente manera (ver figura 2.2): -

a) Para un valor inicial supuesto de las variables X_1, X_2, \dots, X_n , se calcula el gradiente; este define la dirección en la cual crece más rápidamente la función Z.

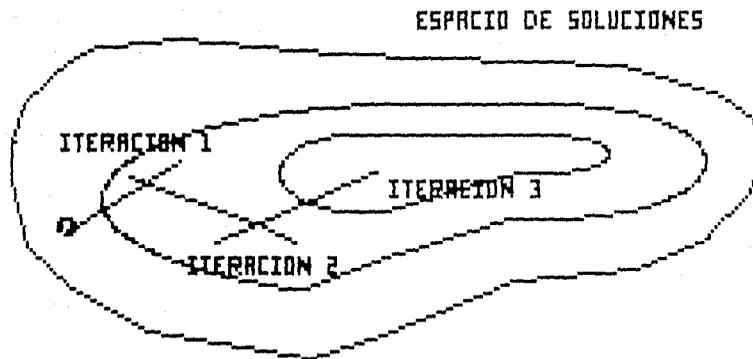
b) Sobre la dirección encontrada en (a), se obtiene el valor mínimo de Z, aplicando el método de Fibonacci^[6] (Rectángulo de Oro), que es de los más utilizados para estos propósitos.

c) Se asigna a las variables X_1, X_2, \dots, X_n , los nuevos valores que minimizan la función Z según (b) y se calcula nuevamente el gradiente para este punto.

d) Se repiten los pasos (b) y (c) hasta que el valor de las variables X_1, X_2, \dots, X_n entre dos iteraciones consecutivas no cambie apreciablemente de acuerdo con una tolerancia preestablecida.

La metodología descrita es muy aplicable en la hidráulica, particularmente en los problemas que tienen que ver con las redes de distribución de agua potable^[7] y en los ajustes de funciones de distribución de probabilidad a gastos fluviales o precipitaciones^[8]. En la referencia ^[6] se puede consultar un análisis a fondo de la teoría expuesta.

**FIG 2.2 ESQUEMA DE LA PROGRAMACION
NO LINEAL**



En $\alpha: X_1, X_2, \dots, X_n$ (COND.INICIALES)

optimo en iteracion 3

2.5.3 PROGRAMACION DINAMICA

Esta técnica de optimización divide el problema en N etapas de decisión, esto es, descompone el problema original en N nuevos problemas cuya solución es equivalente al planteado originalmente. A grandes rasgos lo que se busca es resolver primero la última etapa y usar dichos resultados para resolver la penúltima etapa y así sucesivamente. El planteamiento básico de la programación dinámica se expone a continuación.

Considérese el sistema dinámico discreto

$$x_{i+1} = g_i(x_i, u_i) \quad i = 1, 2, \dots, N$$

x_i se llama variable de estado (este es un vector de variables que resume toda la información del sistema dinámico, i.e. el nivel de almacenamiento en una presa) en el tiempo i , se supone que $x_i \in S_i$ (espacio de estados posibles conocidos). u_i es la variable de decisión y se supone que $u_i \in C_i$ (espacio de decisiones conocido). La función g_i es llamada función de transformación de estados y permite determinar el estado en que se encuentra el sistema en el tiempo $i+1$, dado que se conoce el estado inicial i y que se realizó la decisión u_i .

Conocido el estado inicial x_0 , el objetivo es determinar el conjunto de decisiones (política de decisión) $\pi = (u_1^*, u_2^*, u_3^*, \dots, u_N^*)$ de tal

forma que minimice o maximice la función

$$Z = \sum_{i=1}^N f_i(x_i, x_{i+1}, u_i)$$

sujeto a

$$x_{i+1} = g_i(x_i, u_i) \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$x_i \in S_i \quad ; \quad u_i \in C_i$$

Las funciones g_i y f_i , para toda i , son conocidas.

En general para la etapa k donde $k=1, 2, \dots, N-1$, las decisiones a realizar $(u_k, u_{k+1}, \dots, u_N)$ dependen únicamente del vector de estados x_k . Estas decisiones serán óptimas si resuelven el problema

$$F_k(x_k) = \min_{\{u_i\}} \left\{ f_k(x_k, x_{k+1}, u_k) + \sum_{i=k+1}^N f_i(x_i, x_{i+1}, u_i) \right\}$$

sujeto a

$$x_{i+1} = g_i(x_i, u_i) \quad ; \quad x_i \in S_i \quad ; \quad u_i \in C_i \quad i = k, \dots, N$$

Pero la función objetivo es equivalente a

$$F_k(x_k) = \min_{\{u_k\}} \left\{ f_k(x_k, x_{k+1}, u_k) + \min_{\{u_i\}} \left\{ \sum_{i=k+1}^N f_i(x_i, x_{i+1}, u_i) \right\} \right\}$$

o lo que es igual

$$F_k(x_k) = \min_{\{u_k\}} \{f_k(x_k, x_{k+1}, u_k) + F_{k+1}(x_{k+1})\}$$

por lo cual la solución de la etapa k es equivalente a resolver un problema en una sola decisión (u_k) y dicho problema incorpora los valores óptimos asociados con los estados x_{k+1} calculados en la etapa $k+1$.

El esquema planteado corresponde al caso de la programación dinámica determinística, esto es, la variable x_t no tiene probabilidades asociadas; el asociar probabilidades a dicha variable lleva al planteamiento de la programación dinámica estocástica, la cual caracteriza el sistema dinámico de acuerdo con:

$$x_{i+1} = g_i(x_i, u_i, w_i) \quad i = 1, 2, \dots, N$$

en esta expresión w_i es un vector de variables estocásticas, se supone que estos valores siguen una función de distribución que depende únicamente de x_i y u_i , denotándolo como $PC_i(x_i, u_i)$. Este hecho conduce a utilizar el concepto del valor esperado de los beneficios, ya descritos para el caso de la programación dinámica determinística. Es precisamente esta, la metodología utilizada en aprovechamientos hidráulicos para definir políticas de operación en presas, dadas las características aleatorias o estocásticas de los escurrimientos de entrada al sistema.

3. POLITICA DE OPERACION A LARGO PLAZO EN PRESAS DE ALMACENAMIENTO

3.1 PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMATICA

Dentro de la ingeniería de aprovechamientos hidráulicos, un tópico que ha despertado gran interés es la determinación de normas de operación de las grandes, medianas y pequeñas presas de almacenamiento. En términos generales existen dos tendencias en cuanto a políticas de asignación de agua se refiere, una de ellas muy conservadora en el uso actual del agua, esto es, raciona el volumen de agua disponible en previsión de futuras disminuciones en la oferta del líquido; la otra tendencia favorece el uso inmediato, sin importar los posibles periodos secos futuros.

Ambas tendencias son contraproducentes, por cuanto en la primera puede

ocurrir que la presa tenga también por objeto regular avenidas para proteger contra inundaciones la zona aguas abajo de la misma; seguir la primer política implica un alto riesgo ya que el almacenamiento de la presa, al inicio de la época de lluvias, puede estar en niveles tan elevados que sea imposible la regulación de las avenidas que se presenten, el consecuente daño a zonas urbanas o agrícolas es inminente, inclusive se puede llegar a poner en peligro la estructura propia de la presa. La segunda tendencia puede llevar a un uso indiscriminado del recurso, con el latente peligro de que si se presentan disminuciones en los volúmenes de entrada al embalse, no se disponga de un almacenamiento suficiente para satisfacer la demanda del período.

Es por tanto necesario establecer políticas de operación que tomen en cuenta los diversos factores determinísticos y estocásticos que intervienen en el problema, señalando los volúmenes de agua que deban ser extraídos y almacenados en las diferentes épocas del año.

La mayoría de los métodos existentes para determinar políticas de operación, se basan en la maximización de los beneficios que puedan ser obtenidos en el largo plazo o durante la vida útil de la obra. Dichos beneficios, como podrá verse más adelante, son cuantificables de acuerdo con el uso del agua del embalse (agrícola, urbano, industrial, generación de energía, etc.).

3.2 BENEFICIOS Y COSTOS GENERADOS

En general esta tesis tratará el problema enfocándolo hacia el uso agrícola en combinación con la protección contra avenidas; este es uno de los casos que más frecuentemente se presenta en la práctica. Las metodologías para obtener políticas de operación de una presa requieren de una *función de beneficios* que refleje las ganancias derivadas de la entrega de agua; este inciso se centra en la forma de determinar dicha función.

Beneficios

El beneficio que se obtenga, es directamente proporcional al porcentaje de demanda satisfecha por el volumen de agua que se extrae de la presa. Este beneficio puede también ser variable de acuerdo con la época o etapa de año que se considere. Así en un distrito de riego, usualmente se divide el ciclo agrícola en dos periodos, seco y húmedo, caracterizados por las condiciones climatológicas y limitados por la temporada anual de lluvias.

En la etapa del año n se denota el beneficio por la función $G_n(K)$, que indica la ganancia obtenida al extraer de la presa un volumen de agua K ; estos beneficios pueden ser estimados de diversas maneras, una forma sencilla, si se considera que el rendimiento agrícola es función del volumen de agua suministrado, utiliza la expresión:

$$G_n(K) = \bar{R}(K) * P * Has \quad (3.1)$$

donde

\bar{R} rendimiento promedio del distrito (ton/Ha)

P precio promedio por tonelada de cultivo (\$/ton)

Has número de hectáreas cultivadas

El volumen K para determinar el valor de la función G, es conocido, ya que esta forma de atacar el problema implica el conocimiento histórico del funcionamiento del distrito para un cierto número de ciclos agrícolas, al igual que la historia económica correspondiente a los mismos ciclos. La función de ganancias resultante, es por lo general compuesta por varios tramos de rectas, puede observarse una gráfica tipo en la figura 3.1. Este arreglo de la función, se debe a la diversidad de cultivos que pueden conformar el padrón de trabajo de un distrito de riego. La recta de mayor pendiente es la asignada a los cultivos más redituables, es decir con mayor beneficio marginal.

Cuando no se dispone de la historia económica y de funcionamiento del distrito pero sí se conoce el valor de la demanda total, puede construirse la función G_n como una figura conformada por dos tramos de rectas, según la figura 3.2.

El primer tramo de recta (a) es indicador del beneficio obtenido al entregar un volumen menor al demandado; se aconseja en este caso realizar una estimación aproximada del beneficio unitario (por m^3

entregado) para posteriormente multiplicar este por el valor total entregado. Si aún ello no es posible, se puede asignar un valor arbitrario, conservando en la estructura de costos (posteriormente descrita) las proporciones correspondientes. El objetivo final va dirigido a utilizar un esquema económico que "refleje" las condiciones reales de operación.

Cabe señalar que el origen de la recta (a) en las figuras 3.1 y 3.2, no es necesariamente el punto cero ya que suelen existir situaciones en donde a consecuencia del escaso volumen suministrado, el beneficio se traduce finalmente en una pérdida potencial, con lo cual la ordenada de la recta toma valores negativos en la escala de beneficios.

Es posible obtener la función de beneficios a través de programación lineal⁽⁹⁾, maximizando las ganancias que podrían ser obtenidas durante un ciclo agrícola, sujeto a restricciones de agua y tierra.

Costos

Los costos o penalizaciones en los que puede incurrirse en la operación de una presa con propósitos de riego y control de avenidas pueden ser de dos tipos:

- . Costos por déficit en la entrega prometida
- . Costos por derrames de agua

Los primeros se generan debido al volumen de agua prometido al inicio del ciclo agrícola y no entregado en el transcurso de este. Estos costos deben reflejar las pérdidas monetarias que pueden tener lugar por cosechas malogradas a consecuencia del déficit en el volumen de riego, preparación de terrenos agrícolas no utilizados, etc.

Es normal considerar que de no entregar el volumen de agua prometido, es posible perder no solo el beneficio que deja de obtenerse, sino además parte de la inversión inicial; este estado se conoce como de *aversión al riesgo*⁽⁹⁾ y considera la penalización por déficit mediante la expresión:

$$C_D(V_{D_n}) = V_{D_n} * m_n * A \quad (3.2)$$

donde

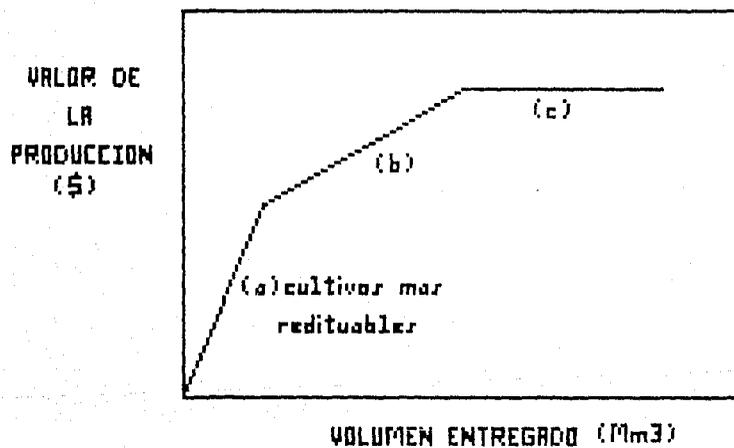
V_{D_n} volumen deficitario en la etapa n

m_n pendiente media de la función de beneficios
(beneficio marginal)

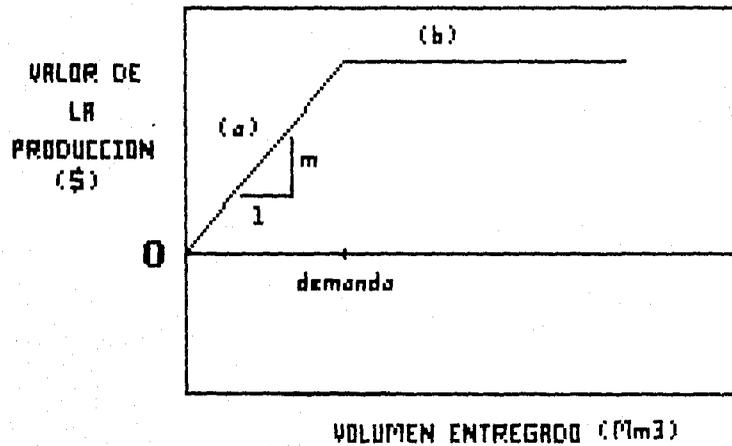
A aversión al riesgo

La expresión $(V_D * m)$ representa el castigo o ganancia que deja de obtenerse al no entregar la presa un volumen V_D . El estado de *indiferencia al riesgo* ocurre para un valor de A igual a 1. El beneficio marginal m_n es el obtenido de los tramos de recta (a), en la función de beneficios (figuras 3.1 y 3.2).

**FIG 3.1 FUNCION DE BENEFICIOS DE UN
DISTRITO DE RIEGO**



**FIG 3.2 FUNCION DE BENEFICIOS DE UN
DISTRITO DE RIEGO (OPCION II)**



El efecto real que sobre beneficios causa el costo o penalización por déficit, se ilustra en la figura 3.3.

El segundo tipo de costo o penalización en el que se incurre, se refiere a las posibles pérdidas derivadas de los volúmenes de agua derramado por el vertedor de la presa; esta penalización está directamente ligada con los posibles daños que puede ocasionar una inundación aguas abajo de la presa. Estos pueden consistir en pérdidas de zonas de cultivo, daños a infraestructura urbana, rural o industrial, pérdida de vidas humanas, etc.

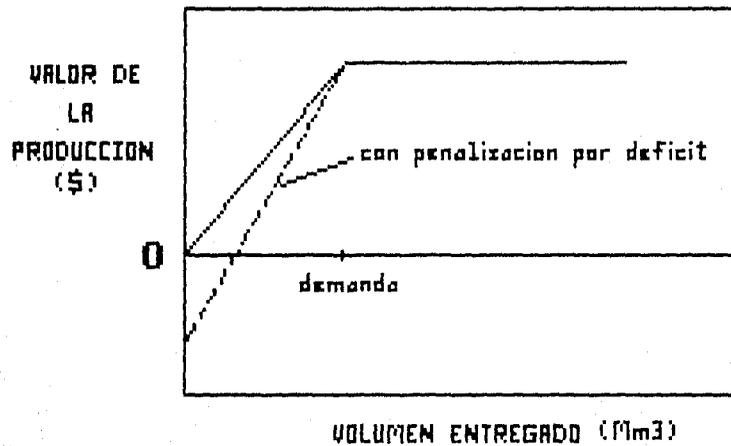
Una manera de calcular esta penalización es utilizando la capacidad del cauce del río; para ello se requiere transitar avenidas de diferente magnitud por el vaso de la presa, adoptando una política de operación del vertedor y relacionando los volúmenes derramados según la ecuación (3.3).

$$C_{A_n}(V_{A_n}) = \begin{cases} J * V_{A_n} * C_c & ; V_{A_n} > C_c \\ 0 & ; V_{A_n} \leq C_c \end{cases} \quad (3.3)$$

donde

C_{A_n} castigo en el beneficio por derrames de agua en la presa durante la etapa n

FIG 3.3 EFECTO DE LA PENALIZACION POR DEFICIT SOBRE EL BENEFICIO



- V_{A_n} volumen de agua derramado durante la etapa n
 C_c capacidad del cauce
 J constante relativa a cada caso en particular

En muchos casos la función se puede conformar de varios tramos de recta (figura 3.4); se destaca que normalmente se tiene información para relacionar la magnitud de los daños con los gastos descargados pero no con volúmenes, motivo por el cual es necesario estudiar la relación existente entre gastos medios vertidos y volumen derramado en cada etapa considerada.

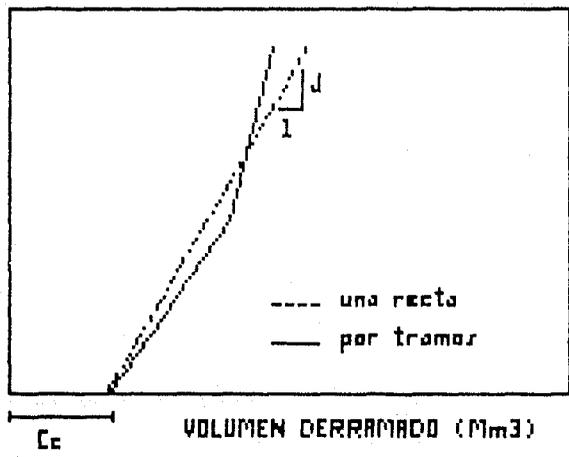
En muchas situaciones en que por falta de los datos necesarios no es posible obtener las funciones de penalización por déficit y derrames, sobre todo cuando no se conocen los parámetros de la función de beneficios, se tiene como opción entrar a un ajuste progresivo de la política, iniciando con la función de beneficios desarrollada según planteamientos descritos y suponiendo un costo unitario del déficit y del derrame, multiplicados por los volúmenes deficitarios y derramados, respectivamente. Se debe además guardar las debidas relaciones de proporción adoptadas en la función de beneficios propuesta. De esta manera los costos por penalización de déficit (C_{D_n}) y derrame (C_{A_n}) toman la forma:

$$C_{D_n} (V_{D_n}) = C_{D_n}^U * V_{D_n} \quad (3.4)$$

y

**FIG 3.4 FUNCION DE PENALIZACION
POR DERRAMES**

COSTO DE
DERRAMES
(\$)



$$C_{D_n}^u (V_{D_n}) = C_{D_n}^u * V_{D_n} \quad (3.5)$$

donde

$C_{D_n}^u$ costo unitario del volumen deficitario

$C_{D_n}^u$ costo unitario del volumen derramado

En cualquiera de los casos, el beneficio neto obtenido al entregar un volumen de agua K_n del almacenamiento de una presa durante la etapa n , es:

$$b_n^{k_n} (\bar{V}) = G_n^{k_n} (\bar{V}) - C_{D_n}^u (V_{D_n}) - C_{A_n}^u (V_{A_n}) \quad (3.6)$$

En la ecuación (3.6) $b_n^{k_n}$ representa el beneficio neto; se ha incluido la dependencia del valor del almacenamiento medio en la presa, \bar{V} , durante la etapa, ya que corresponde a la variable de decisión para definir las reglas de operación de la presa. Todas las funciones mencionadas en este inciso deben ser univaluadas, es decir, para cada valor de volumen debe ser asignado uno y solo un valor de beneficios o costos.

3.3 FUNCIONAMIENTO DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO

Para poder cumplir satisfactoriamente con los objetivos hacia los cuales se encamina la operación de una presa, es necesario que sus componentes sean convenientemente conocidos. En la figura 3.5 se describe cada una de las capacidades que la integran.

La capacidad de regulación tiene por objeto controlar las avenidas que se generan en la cuenca localizada aguas arriba del embalse y cobra particular importancia en el control de inundaciones y en la seguridad estructural de la presa. Esta capacidad debe absorber los gastos pico de las avenidas y en forma paralela de acuerdo con la política de operación de la obra de excedencia, descargar gastos de menor magnitud y por tanto con menor potencial de daños aguas abajo.

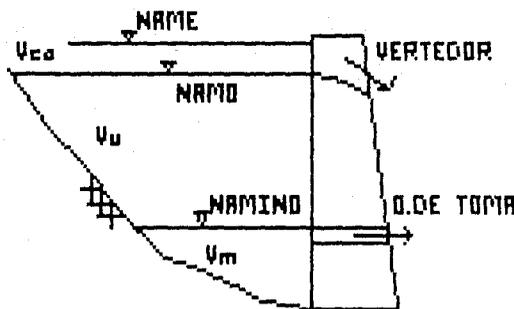
La capacidad útil es muy importante ya que cumple la función de almacenar grandes cantidades de agua para ser utilizada posteriormente a la temporada de avenidas. En este caso los volúmenes desfogan por la obra de toma, acorde a la política de operación a largo plazo implementada en el embalse.

La capacidad muerta almacena el volumen de sedimentos que durante la vida útil de la presa va a ser arrastrado por la corriente. Estos sedimentos se originan por el desgaste del material que forma la cuenca de captación.

FIG 3.5 COMPONENTES DE UNA PRESA

(A)

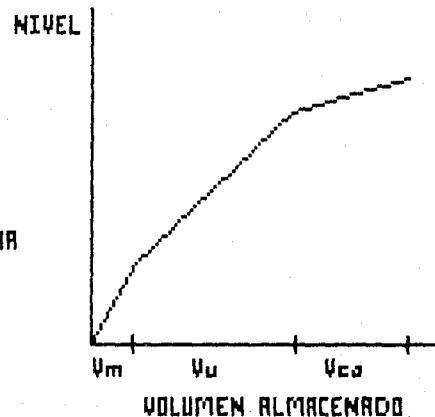
COMPONENTES



V_u CAPACIDAD UTIL
 V_m CAPACIDAD MUERTA
 V_{ca} CAP. DE CONTROL DE AVENIDAS

(B)

CURVA ELEVACIONES-CAPACIDADES



El funcionamiento de una presa se rige por la ecuación de continuidad, dada en forma simple como:

$$\Delta V_n = E_n - S_n \quad (3.7)$$

con

ΔV_n tasa de variación del almacenamiento en el período n

E_n gasto de entrada a la presa durante el período n

S_n gasto de salida de la presa en el período n

como

$$\Delta V = \frac{V_F - V_I}{\Delta t} \quad (3.8)$$

con

V_I volumen almacenado en la presa al inicio de la etapa n

V_F volumen almacenado en la presa al final de la etapa n

Δt ($t_F - t_I$) duración del período de tiempo n

Sustituyendo la ecuación (3.8) en la (3.7) se obtiene:

$$V_F = V_I + X_n - K_n \quad (3.9)$$

en la que

$X_n = E_n * \Delta t$ volumen de entrada durante la etapa n

$K_n = S_n * \Delta t$ volumen de salida durante la etapa n

Obviamente las salidas de la presa se constituyen por las descargas del vertedor y los desfogues que tienen lugar por la obra de toma.

Se acostumbra llamar a las extracciones de la presa (K_n), según el análisis de sistemas, como la variable de decisión, y al volumen almacenado en cualquier tiempo (V_j) como la variable de estado. Ambas variables están restringidas por las dimensiones de cada una de las obras. En el caso de las extracciones, dicho volumen no puede exceder al de máxima descarga de la presa compuesta por la capacidad del vertedor de excedencias (V_v) y de la obra de toma (V_{ot}), según:

$$0 \leq K_n \leq (V_v + V_{ot}) \quad (3.10)$$

Por otro lado el almacenamiento en la presa debe ser mayor o igual que la capacidad muerta, ubicada por debajo del nivel de la obra de toma (NAMINO), y menor o igual que el volumen almacenado hasta la elevación de la cresta del vertedor (NAMO), esto es, el almacenamiento efectivo es el que constituye la capacidad útil (ver figura 3.5 b), o sea que el volumen que almacena la presa en condiciones normales de operación (V_x) es:

$$0 \leq V_x \leq V_u \quad (3.11)$$

De acuerdo con las condiciones del nivel de almacenamiento, en una presa se pueden presentar dos estados críticos. Uno denominado de superávit o de derrame, en el nivel más alto del embalse; se llega a dicho estado cuando a pesar de la extracción es necesario derramar cierto volumen de agua que excede a la capacidad útil disponible. El volumen derramado durante la etapa n (V_{A_n}) en el estado de superávit se calcula con la expresión:

$$V_{A_n} = \begin{cases} V_I - V_U + X_n - K_n & ; \text{ si } V_U > V_I + X_n - K_n \\ 0 & ; \text{ si } V_U \leq V_I + X_n - K_n \end{cases} \quad (3.12)$$

En la anterior ecuación, el valor de K_n solo incluye la extracción por la obra de toma; por tanto la extracción total a la presa es ($V_{A_n} + K_n$).

El segundo estado crítico es el de déficit, y ocurre cuando se requiere extraer mayor volumen que el almacenado en la capacidad útil de la presa. En este caso existirá un déficit en la entrega del volumen demandado durante el periodo n (V_{D_n}) dado según la expresión:

$$V_{D_n} = \begin{cases} V_m - (V_I + X_n - K_n) & ; \text{ si } V_m > V_I + X_n - K_n \\ 0 & ; \text{ si } V_m \leq V_I + X_n - K_n \end{cases} \quad (3.13)$$

3.4 FUNCION OBJETIVO

Los objetivos al operar cualquier sistema de aprovechamientos hidráulicos están encaminados a obtener el máximo beneficio del sistema durante la vida útil de las obras. Este beneficio está condicionado por diversos factores de tipo determinístico y de tipo aleatorio. Entre los factores determinísticos, en el caso de una presa, se pueden mencionar las características físicas de esta y el volumen demandado por sector o sectores usuarios. El factor aleatorio o estocástico lo constituyen los volúmenes de entrada a la presa, tipificados en la función de distribución de probabilidad:

$$F_{x_n} (X) = P (X \leq x_n) \quad (3.14)$$

donde x_n representa a la variable aleatoria del volumen de escurrimiento que entra a la presa en la etapa n. En esta tesis se considera independencia probabilística entre el volumen de escurrimiento generado entre etapas consecutivas, lo que quiere decir que el volumen escurrido en la etapa n, no depende del que se presenta en la etapa n-1; en algunos casos, sobre todo cuando los períodos considerados son de corta duración, es necesario tomar en cuenta la dependencia consecutiva de los escurrimientos mediante la función de distribución de probabilidad condicionada⁽¹⁰⁾.

Durante la vida útil de una presa se genera una corriente de

beneficios que depende directamente del volumen de agua que puede ser entregado, con las restricciones impuestas por los componentes determinísticos y aleatorios. Dicha corriente de beneficios se esquematiza en la figura 3.6, la cual corresponde al diagrama de flujo de dinero considerando dos etapas anuales.

Cabe aclarar que la corriente de beneficios descrita se refiere estrictamente a los generados por la presa como sistema productivo, razón por la cual no deben ser incluidos los costos de construcción, operación y mantenimiento, relacionados directamente con la selección óptima de la capacidad de la presa en las etapas de diseño de la misma.

Si se desea conocer el valor total del beneficio que será obtenido durante la vida útil de la obra, a precios de un año base, se debe considerar una tasa de interés anual incluida en el concepto de factor de descuento, según:

$$\beta = \left[\frac{1}{(1 + i)} \right]^J$$

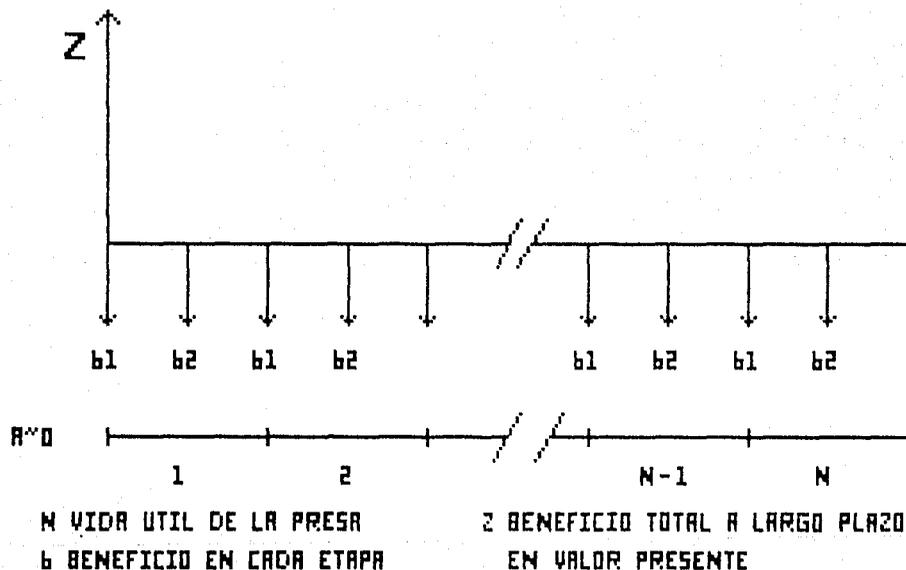
donde

β factor de descuento

i tasa de interés anual

J número del año

**FIG 3.6 CORRIENTE DE BENEFICIOS GENERADA
CON LA OPERACION DE UNA PRESA**



N VIDA UTIL DE LA PRESA
 b BENEFICIO EN CADA ETAPA

Z BENEFICIO TOTAL A LARGO PLAZO
EN VALOR PRESENTE

Para disponer de una notación funcional, la expresión (3.15) se maneja en adelante como β^j . Al pasar a valor presente (Z) de un año base la corriente de beneficios de la figura 3.6, se obtiene:

$$Z = (b_1 + \beta^{\frac{1}{2}} * b_2) + \beta^1 (b_1 + \beta^{\frac{1}{2}} b_2) + \dots + \beta^N (b_1 + \beta^{\frac{1}{2}} * b_2)$$

Se observa que en cualquier año deben ser expresados inicialmente los beneficios obtenidos en la segunda etapa anual al tiempo de la primera etapa, y luego el beneficio total de ese año a tiempo del año base. La siguiente expresión generaliza lo expuesto:

$$Z = \sum_{i=1}^N \beta^i (b_1 + \beta^{\frac{1}{2}} * b_2) \quad (3.16)$$

donde N representa los años de operación del sistema o presa.

Si se toma en cuenta que en una presa los beneficios dependen también de factores aleatorios, y que además, ellos se desean maximizar en función de la variable de decisión definida por las extracciones K_n , la expresión final de la función objetivo para dos etapas anuales es:

$$\max_{K_1, K_2} Z = E_x \left\{ \sum_{i=1}^N \beta^i [b_1(K_1, \bar{V}_1) + \beta^{\frac{1}{2}} * b_2(K_2, \bar{V}_2)] \right\} \quad (3.17)$$

La literal E de la ecuación (3.17) se refiere a la esperanza o valor

esperado de los beneficios y se incluye para considerar la condición aleatoria de los volúmenes de entrada al embalse; la expresión constituye la función objetivo que debe ser maximizada para obtener la política de operación de una presa, relacionando las variables de estado (almacenamiento en la presa en cada etapa i , \bar{V}_i) con las de decisión (extracciones por etapa, K_i).

Para completar el planteamiento del modelo de optimización aplicado al caso de operación de una presa, destinada al riego agrícola y control de avenidas, la expresión (3.17) está sujeta a restricciones de funcionamiento dadas por las ecuaciones (3.9) a (3.13). Se incluye también dentro de la literal del beneficio, el hecho de que este depende del valor de las variables de estado y de decisión.

A partir del procedimiento descrito, es sencillo extrapolar el planteamiento al caso de dividir al año en un mayor número de etapas.

3.5 METODO DE SOLUCION APLICANDO PROGRAMACION DINAMICA

La no linealidad de la función objetivo conduce a utilizar con éxito este tipo de técnica, en la cual es necesario definir de antemano los posibles estados que puede tomar el sistema. Una característica muy importante de la programación dinámica y que apoya definitivamente su uso en la definición de políticas de operación en presas de almacenamiento, es que no obtiene una solución estática de la forma

$U=f(s)$, sino que ofrece una secuencia de decisiones, $U_t=f(s_t, t)$ para cada situación (estado s) del sistema (presa) y cada etapa (mes o estación t). Así en el problema tratado se deberán discretizar los niveles de almacenamiento de la presa, acotados por la capacidad útil de la misma. Con base en ello se obtiene finalmente un conjunto de decisiones de extracción correspondientes a cada estado del volumen de almacenamiento discretizado.

La ecuación recursiva de la programación dinámica, aplicada al problema en cuestión es:

$$B_m^k(i) = b_m^k(i, j) + \max \left\{ B_{m+1}^k(j) \right\} \quad (3.18)$$

donde

$B_m^k(i)$ beneficio neto obtenido del funcionamiento de la presa desde el *final* de la vida útil hasta la etapa m , para un nivel de almacenamiento i , extrayendo durante la etapa m un volumen k_m

$b_m^k(i, j)$ beneficio en la etapa m , cuando se extrae a la presa un volumen k_m y el nivel de almacenamiento pasa del estado inicial i , al final j

$\max \left\{ B_{m+1}^k(i,j) \right\}$ expresión que representa la selección del volumen óptimo de extracción que acarrea el máximo beneficio neto acumulado, desde el año final N de la vida útil, hasta la etapa $m+1$

Al considerar el carácter aleatorio de los escurrimientos de entrada a la presa durante la etapa m , es necesario, según la función objetivo (3.17), tomar en cuenta el valor esperado de los beneficios, con lo cual la ecuación recursiva de la programación dinámica, queda:

$$E_m^k(i) = E_x \left\{ b_m^k(i,j) + \max \left[B_{m+1}^k(j) \right] \right\} \quad (3.19)$$

o lo que es igual

$$B_m^k(i) = \sum_j \left\{ p_m^k(i,j) \left\{ b_m^k(i,j) + \max \left[B_{m+1}^k(j) \right] \right\} \right\} \quad (3.20)$$

La expresión (3.18) corresponde al esquema planteado por la programación dinámica determinística y la (3.20) al de la programación dinámica estocástica.

El valor $p_m^k(i,j)$ representa la probabilidad de transición del sistema en la etapa m , al pasar del estado inicial i al final j , bajo la extracción k_m . Debido a que el proceso descrito es estacionario, las

probabilidades de transición se mantienen constantes en cada período o etapa de la vida útil de la presa, esta consideración implica manejar en cada período que la integra, la misma función de densidad de probabilidad de los escurrimientos.

Con base en lo expuesto, se puede observar que para una extracción dada existen $i \cdot j$ posibles transiciones del sistema analizado; este hecho permite entonces hacer referencia a una *matriz de transición de los estados del sistema*⁽¹¹⁾. Esta matriz retrata las probabilidades del sistema de alcanzar las condiciones finales (j), dadas las condiciones iniciales (i) y la extracción; en el proceso existen tantas matrices de transición como alternativas de extracción a la presa o sistema. En el mismo caso se encuentran los beneficios obtenidos en las transiciones del sistema, esto es, el paso del sistema desde la condición inicial, i , a la final, j , genera un beneficio que debe ser valuado con base en la expresión (3.6). En la literatura técnica del tema se hacen referencia a este conjunto de valores como *matriz de beneficios*.

Para resolver el problema mediante la ecuación (3.20) se utiliza un esquema simplificado de aproximaciones sucesivas. Antes de pasar a su planteamiento es necesario realizar algunas actividades previas, que se describen a continuación:

a) Discretizar los niveles de almacenamiento de la presa acotados por la capacidad útil (V_u). Se debe seleccionar un incremento de volumen ΔV , de tal forma que el número de estados (NE) definidos es:

$$NE = V_u / \Delta V \quad (3.21)$$

b) Discretizar volúmenes de entrada a la presa (X) tipificados en la función de densidad de probabilidad, para cada uno de los periodos interanuales considerados. Se debe utilizar el mismo incremento de volumen ΔV , obteniendo las probabilidades medias en el intervalo de partición según:

$$p [(n) \cdot \Delta V \leq X \leq (n+1) \cdot \Delta V] , \quad n = 1, 2, \dots, NQ \quad (3.22)$$

En un periodo existirán aproximadamente un número de ordenadas de la función de densidad (NQ), dados por :

$$NQ = X_{\max} / \Delta V \quad (3.23)$$

X_{\max} es el volumen máximo de escurrimiento en el periodo.

c) Discretizar los posibles volúmenes de extracción que pueden ser suministrados por la presa en cada periodo considerado. Esto se realiza tomando en cuenta la capacidad máxima de descarga de la obra de toma (COT) y generando las alternativas de acuerdo con:

$$NK = COT / \Delta V \quad (3.24)$$

Como puede observarse, en todo momento se trabaja con la misma discretización de volumen, ΔV , para los estados y las decisiones; este hecho simplifica en gran medida el esquema de solución que a continuación se aborda.

Con base en las condiciones de estacionaridad del proceso y de discretización de las variables que intervienen, es posible realizar algunas simplificaciones a la expresión (3.20), las cuales redundarán posteriormente en reducir los cálculos. El producto de la probabilidad y el beneficio en la transición es constante a lo largo de todo el proceso de optimización, por lo que puede considerarse una nueva variable:

$$\gamma_m^k(i) = \sum_j p_m^k(i,j) * b_m^k(i,j) \quad (3.25)$$

El valor de la variable γ se denomina *beneficio inmediato esperado* cuando el nivel de almacenamiento en la presa al inicio del período es i ; el conjunto de valores que forman estos, para todos los niveles, se acostumbra llamarlo *vector de beneficios inmediatos esperados*.

Si, en general, se hace referencia al beneficio óptimo alcanzado en cada nivel de almacenamiento y cada paso en el proceso iterativo (en realidad cada paso corresponde a una etapa) de la programación dinámica estocástica, entonces:

$$B_m^N(i) = \max \left\{ B_m^k(i) \right\}$$

y

$$B_m^V(j) = \max \left\{ B_{m+1}^k(j) \right\}$$

con lo que finalmente se llega a la expresión simplificada:

$$B_m^N(i) = \gamma_m^k(i) + \sum_j p_m^k(i,j) * B_m^V(j) \quad (3.26)$$

La expresión (3.26) indica la presencia de dos componentes que definen una decisión; un beneficio esperado durante la etapa y un beneficio esperado a largo plazo hasta cubrir la longitud de la vida de la obra. Esta ecuación debe ser aplicada en sentido inverso al tiempo presente, esto es, desde el final de la vida útil hasta un año base en que no cambien los incrementos en los beneficios calculados para cada opción de extracción; se aplica a cada etapa y cada nivel de almacenamiento discretizado. El procedimiento de aplicación se describe a continuación :

- a) Realizar las actividades previas de discretización y calcular las probabilidades de transición asociadas a cada extracción, $p_m^k(i,j)$, además del vector de beneficios inmediatos esperados, $\gamma_m^k(i)$.

b) Suponer una condición de frontera en el límite extremo (F), de la vida útil, que puede ser

$$B_F^V(i) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, NE$$

c) Aplicar la expresión (3.26) en la etapa siguiente superior, para cada nivel de almacenamiento y cada alternativa de extracción, tomando en cuenta las probabilidades de ocurrencia de cada posible volumen de entrada a la presa. Se genera así el valor $B_m^N(i)$, seleccionado para cada nivel, i , como el asociado a la extracción que produce el mayor beneficio.

d) Calcular el incremento en los beneficios que tiene lugar durante la etapa, para cada nivel de almacenamiento como

$$\Delta B_m(i) = B_m^N(i) - B_m^V(i)$$

e) Comparar los incrementos $\Delta B_m(i)$ con los de la etapa procesada anterior $\Delta B_{m+1}(i)$; si para algún nivel de almacenamiento existe diferencia, volver al paso (b), en caso contrario la política queda definida por el vector de extracciones k_m asociado en ese momento a cada nivel de almacenamiento.

Si se manejan dos o más etapas interanuales el procedimiento es el mismo, con las salvedades de que el paso (a) se debe realizar para cada una y los pasos (d) y (e) únicamente hasta completar cada ciclo anual, esto es, independientemente de los periodos en que se divida el año, los incrementos en beneficios se calculan al completar el ciclo.

En la figura (3.7) se esquematiza la aplicación de la programación dinámica al problema analizado y a continuación se aclaran algunos detalles de cálculo.

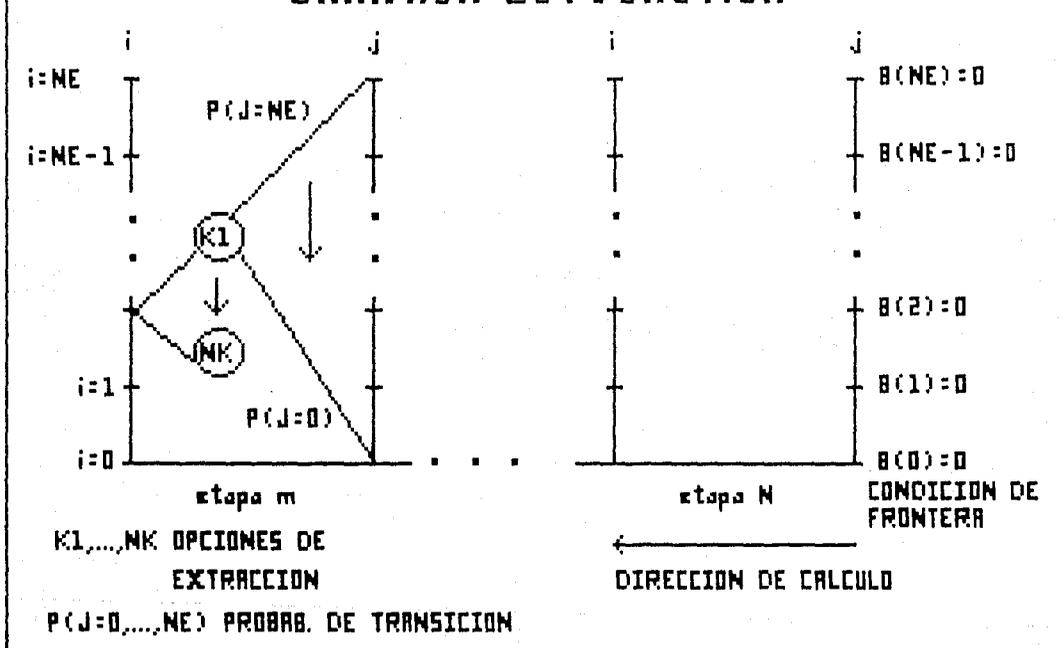
En el paso (a) se necesitan conocer los estados finales de la transición, dado el estado inicial y la extracción; para esto es necesario aplicar la ecuación de continuidad (3.9), en la que introduciendo la discretización de los estados de almacenamiento (actividad previa) según las expresiones:

$$\begin{aligned}V_F &= i * \Delta V + V_m \\V_I &= j * \Delta V + V_m \\X_n &= q * \Delta V \\K_n &= k * \Delta V\end{aligned}\tag{3.27}$$

queda como

$$j = i + q - k\tag{3.28}$$

FIG 3.7 ESQUEMA DE LA PROGRAMACION DINAMICA ESTOCASTICA



sujeta a las restricciones (3.10) y (3.11), que afectadas por la discretización de estados resultan:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq i \leq NE \\
 0 &\leq j \leq NE \\
 0 &\leq k \leq NK
 \end{aligned}
 \tag{3.29}$$

Para analizar los estados críticos de déficit y superávit, se deben utilizar las ecuaciones (3.12) y (3.13) reescritas como:

para el derrame

$$v_{a_m} = \begin{cases} i - NE + q - k & ; \text{ si } NE > i + q - k \\ 0 & ; \text{ si } NE \leq i + q - k \end{cases}
 \tag{3.30}$$

y para el déficit

$$v_{d_m} = \begin{cases} k - i - q & ; \text{ si } i + q - k < 0 \\ 0 & ; \text{ si } i + q - k \geq 0 \end{cases}
 \tag{3.31}$$

Matriz de transición

Los elementos de la matrices de transición para cada alternativa de extracción, que deben ser calculados en la misma actividad (a), son fácilmente deducibles, ya que para un esquema fijo de extracción y niveles de almacenamiento, según la ecuación de continuidad (3.28), el volumen de entrada requerido sería:

$$q = j - i + k \quad (3.32)$$

Valor que tiene asociada la probabilidad $p(q)$, en la función de densidad de probabilidad discretizada, asignando dicho valor a la probabilidad de transición $p_m^k(i, j)$; si el valor de q resultante no existe en la función $p(q)$, indica que la probabilidad en la transición analizada es cero.

Un caso particular muy interesante e importante es la determinación de las probabilidades de alcanzar los estados críticos. En el caso del derrame, estado final $j = NE$, si al aplicar la ecuación (3.32) se obtiene que la presa alcanza dicho estado con un volumen de entrada q , menor que el máximo posible q_{max} dentro de la función de densidad de probabilidad, o sea si $q < q_{max}$; ello indica que para el rango de entradas entre ambos valores ($q \leq x \leq q_{max}$), se alcanza al finalizar el período el mismo estado de derrame $j=NE$, debiendo asignarse por

tanto la suma de las probabilidades de los escurrimientos a la transición estudiada según:

$$p_m^k(i, NE) = \sum_{x=q}^{q_{\max}} p(x) \quad (3.33)$$

los volúmenes que derraman con cada alternativa de entrada (q) deben ser calculados con la expresión (3.30), este dato cobra particular importancia al evaluar el beneficio esperado en la transición ya que para cada q se debe aplicar la ecuación (3.6) que incluye el conocimiento de dichos volúmenes. El beneficio neto esperado de la transición, en este caso es también la suma de los productos de las respectivas probabilidades de los escurrimientos por los beneficios particulares que cada uno genera.

Con respecto al estado del déficit, este tiene similitud al de derrame explicado; si al analizar una transición de cualquier estado inicial al estado final de déficit, $j = 0$, la aplicación de la ecuación (3.32) arroja un valor de q mayor que el mínimo que registra la función de densidad de probabilidad de escurrimientos, $q > q_{\min}$, esto indica que para entradas menores a la resultante, existirá un déficit en la entrega, por lo cual al calcular la probabilidad de la transición es necesario asignarle la suma de las correspondientes a los valores

incluidos en el intervalo $q_{\min} \leq x \leq q$, o sea:

$$P_m^k(i, 0) = \sum_{x=q_{\min}}^q p(x) \quad (3.34)$$

Los volúmenes deficitarios que se presentan en cada caso se calculan utilizando la ecuación (3.31); en cuanto a los beneficios esperados de la transición, son válidos los comentarios mencionados en el caso anterior.

Existen otros procedimientos que llevan a la solución de la expresión (3.20), uno de los más difundidos en la literatura técnica de la ingeniería hidráulica es el método iterativo de mejoramiento de políticas, propuesto por Ronald Howard (1960)^[10]; este método es adecuado a casos en los cuales se manejan pocos periodos interanuales ya que su solución implica la solución sucesiva de un sistema de ecuaciones que define la política^[9,11].

3.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL METODO

La programación dinámica presenta diversas ventajas y desventajas, paralelas en gran medida a las dimensiones de cada problema particular analizado.

Aplicado al caso de presas, la magnitud de las operaciones que toma la solución del problema es dada según las siguientes relaciones:

a) Con programación dinámica determinística, es decir, si se suponen conocidos los escurrimientos de entrada, la cantidad de alternativas analizadas es de una por cada nivel inicial, una por cada opción de extracción, y una por cada nivel final y un conjunto de las mismas por cada etapa considerada, o sean:

$$(NE)^2 * NK * M \quad \text{alternativas}$$

NK número total de alternativas de extracción

M número total de etapas en el año consideradas

b) Con programación dinámica estocástica, considerando la función de densidad de probabilidad de los escurrimientos, se debe considerar, en adición a las del inciso anterior, que por cada alternativa de extracción, se revisan adicionalmente las probabilidades de llegar a cada uno de los estados finales, por tanto se analizan:

$$(NE)^3 * M * NK \quad \text{alternativas}$$

El procedimiento de la programación dinámica implica una dirección de cálculo de futuro a presente; esta estructura permite reducir el problema en cuanto al volumen de operación necesario para determinar una política de operación óptima. Si el cálculo se debiera realizar en la dirección contraria, de presente a futuro, se tendrían que analizar por cada alternativa de partida (nivel de almacenamiento) todas las alternativas finales consecutivamente para cada etapa hasta cubrir todo el período de la vida útil, por lo cual a grosso modo (sin

considerar alternativas de extracción) el volumen de cálculos sería de:

$$(NE)^M \quad \text{alternativas}$$

Si por ejemplo se divide la capacidad de la presa en 10 estados y se divide el año en 10 etapas; considerando una alternativa de extracción, con el método directo se analizarían 10'000'000'000 (10^{10}) alternativas, con programación dinámica determinística 1000 alternativas ($10^2 \cdot 10$) y con programación dinámica estocástica 10'000 ($10^3 \cdot 10$) alternativas. Si solo se supone que una alternativa es procesada por la computadora en una centésima de segundo, el tiempo de cómputo con el método directo sería de 317 años, de 10 segundos con la programación dinámica determinística y de 2 minutos con la programación dinámica estocástica. Este simple cálculo dá idea de la utilidad de la programación dinámica en la solución del problema estudiado.

Sin embargo, cuando el problema es de mayor dimensión al de una presa de almacenamiento, como por ejemplo en el caso de dos presas en paralelo, se incrementa también el volumen de cálculos, así se requeriría del análisis de

$$(NE1 \cdot NE2)^3 \cdot (NK1 \cdot NK2) \cdot M \quad \text{alternativas}$$

incrementando fuertemente el volumen de cálculos y tiempo de cómputo, a pesar de manejar un número reducido de estados en cada presa.

4. POLITICA DE OPERACION CONJUNTA A LARGO PLAZO DE SISTEMAS COMPLEJOS DE ALMACENAMIENTO

4.1 EL SISTEMA DE DOS PRESAS EN PARALELO

Se presenta este tipo de sistemas en diversidad de ocasiones, ya que es común que una o más presas de almacenamiento, sean las principales fuentes de abastecimiento a grandes poblaciones urbanas y distritos de riego.

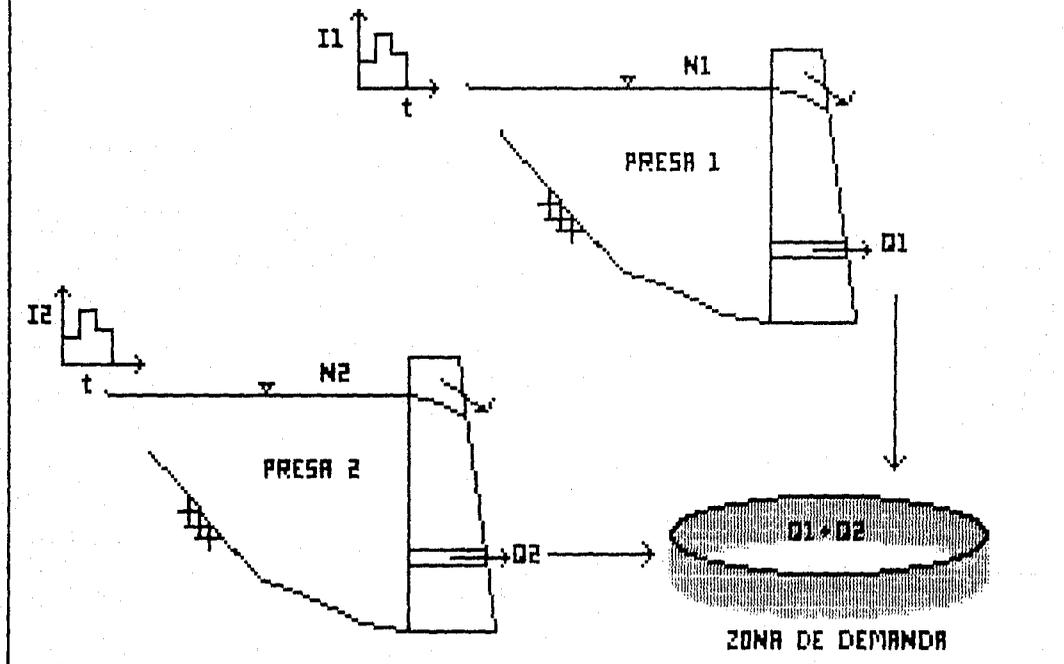
En este caso el problema de operación estriba en manejar conjuntamente y de la mejor manera posible el almacenamiento disponible en cada una de las presas, tomando además en cuenta las restricciones de funcionamiento impuestas por las dimensiones de las estructuras de descarga o desfogue de las mismas, como son el vertedor de excedencias y la obra u obras de toma.

En cuanto al funcionamiento, la ecuación (3.9) gobierna el comportamiento hidráulico de cada presa. Una política de operación conjunta de dos presas en paralelo, en la mayoría de los casos implica independencia probabilística de los escurrimientos de entrada a cada una y dependencia de los niveles de almacenamiento particulares, para tomar la decisión de extracción simultánea al inicio del período. Tomar la decisión más adecuada depende, entre otros factores, de plantear una estructura de costos acorde a la realidad, que refleje necesariamente la jerarquía de cada una de las variantes que integran la problemática; al respecto se ahondará posteriormente.

El problema se esquematiza en la figura 4.1; en esta, los volúmenes de salida Q_1 y Q_2 (decisión) dependen conjuntamente de los niveles de almacenamiento N_1 y N_2 de cada presa (estado del sistema), respectivamente, y del volumen requerido por la zona de demanda. Los hidrogramas de entrada a cada presa, aunque presentan independencia probabilística entre ellos, siguen constituyendo la parte estocástica o aleatoria del problema.

Como puede verse existe una gran similitud con respecto al problema de una sola presa, haciendo la salvedad de que en este caso los estados del sistema tienen en este caso dos componentes y de acuerdo con estos deberá tomarse la decisión de extracción simultánea.

**FIG 4.1 SISTEMA DE APROVECHAMIENTO
HIDRAULICO DE DOS PRESAS EN PARALELO**



4.2 EL PROBLEMA DE OPERACION DEL SISTEMA PRESA-ACUIFERO

Se introduce este inciso con objeto de presentar la completa similitud que existe entre este problema y el de operación de dos presas en paralelo, remarcando que la metodología expuesta en esta tesis es aplicable también a mejorar la operación de sistemas complejos que manejan conjuntamente aguas superficiales y subterráneas.

En la actualidad el manejo de aguas subterráneas se dificulta por diversas causas; en ocasiones la falta de conocimiento de las variables geohidrológicas en calidad y cantidad, imposibilita normas de regulación con miras a optimizar el uso del recurso. Aunado a ello, algunas veces se presentan problemas de tipo social o político, cuyas acciones de solución van en contra de los objetivos técnicos que puedan ocasionalmente ser planteados. Algo muy similar se puede decir en el aspecto de aguas superficiales, en donde la asignación de agua al inicio de los ciclos agrícolas presenta elevadas tendencias a crear algunos problemas políticos.

Desde el punto de vista técnico, en ambos rubros se persigue por un lado surtir de la mejor manera posible los volúmenes demandados, y por otro tener una preservación adecuada de los recursos.

Con respecto al agua subterránea, se persigue el establecer los niveles máximos y mínimos de extracción, definiendo de esta manera la

capacidad efectiva del almacenamiento, sobre la cual deberá planearse una regulación adecuada; si se compara con una presa, esta capacidad es la correspondiente a la capacidad útil del embalse. Dentro de la geohidrología se acostumbra dividir los recursos subterráneos en 2 componentes:

- . Recursos estáticos o no renovables
- . Recursos dinámicos o renovables

Los primeros se refieren al almacenamiento neto en el acuífero bajo condiciones naturales y representa el recurso que debe ser preservado para eventuales condiciones críticas de la zona, como por ejemplo periodos de sequías.

Los segundos se refieren al volumen anual de recarga, procedente de la infiltración vertical que puede tener lugar por mecanismos naturales (precipitación) o artificiales (actividades agrícolas).

Como puede palpase, la determinación adecuada de estos componentes es de primordial importancia para alcanzar los objetivos propuestos.

A continuación se definen brevemente algunos conceptos importantes en esta área de la hidráulica y que permiten el entendimiento adecuado de conceptos posteriores.

. Acuífero.- es una estructura hidráulica natural, que almacena y permite el flujo de agua subterránea a través de ella. Existen en general dos tipos de acuífero, libre y confinado. El acuífero libre se caracteriza por tener el almacenamiento bajo presión atmosférica, no así el confinado en el cual el almacenamiento está a presión hidráulica, en este caso la presión depende de diversos factores, entre otros, elevación de la zona de recarga, espesor del confinante, etc (ver figura 4.2).

.Capacidad de bombeo instalada.- se refiere al potencial de extracción de los pozos perforados en el acuífero y que sería el equivalente a la capacidad de la obra de toma en una presa de almacenamiento.

.Recarga estacional.- son los recursos dinámicos, asociados a cada período interanual considerado.

.Abatimiento.- se refiere al decremento en los niveles de agua del acuífero, producto de las extracciones de los pozos.

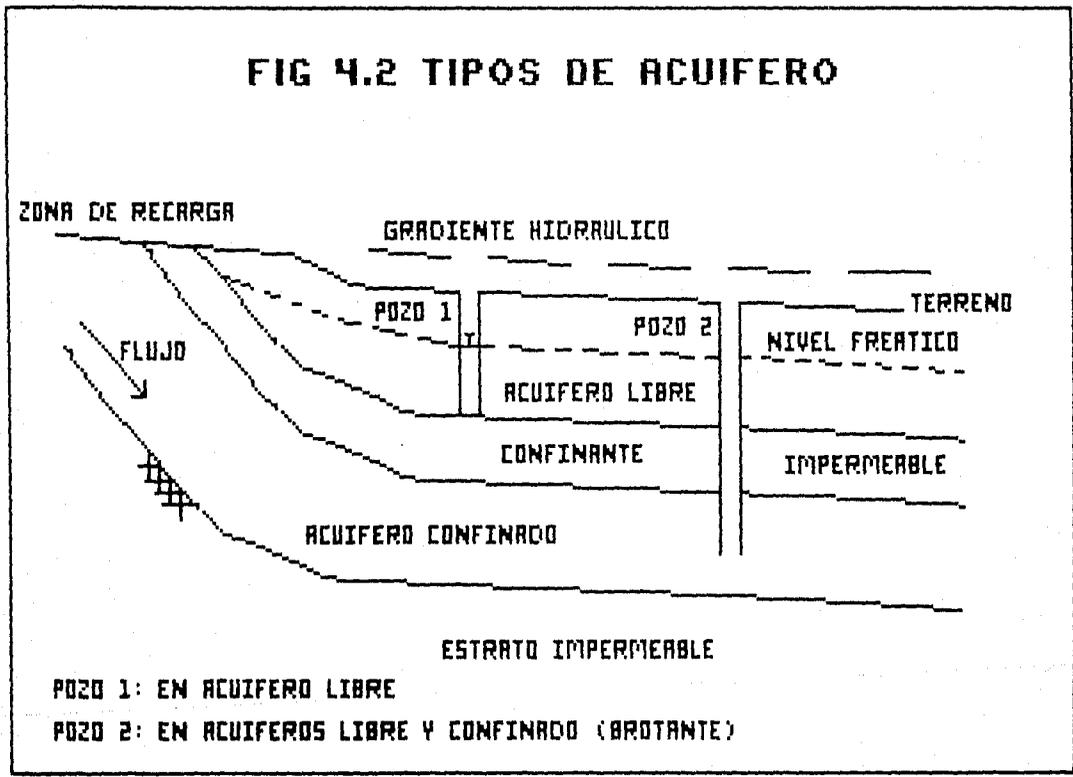
La cuantificación de los recursos estáticos (RE), se puede realizar utilizando la expresión:

$$RE = A * H * S \quad (4.1)$$

donde

A área en planta del acuífero

FIG 4.2 TIPOS DE ACUIFERO



- H espesor de la zona saturada en condiciones originales o naturales del acuífero (antes de iniciar el bombeo)
- S porosidad efectiva del material (relación entre el volumen de material y el volumen saturado)

Los recursos dinámicos (RA), es factible cuantificarlos por medio de *balances de agua subterránea*^[12]; en este proceso se consideran los componentes de entrada y salida durante un periodo determinado, según:

$$RA - DA = \Delta VA \quad (4.2)$$

donde

- RA entradas netas al acuífero-recursos dinámicos
- DA salidas netas del acuífero
- ΔVA variación en el volumen almacenado por el acuífero durante el periodo

La amplitud del tema no permite una mayor extensión, ya que se saldría de los objetivos de esta tesis, sin embargo en las referencias^[13] y^[14] se pueden consultar amplia y exhaustivamente los conceptos y procedimientos aquí mencionados.

Con base en lo descrito, es posible afirmar que una política de operación en un acuífero implica definir las reglas de extracción de los recursos dinámicos y estáticos, de tal forma que no se vea

afectada la preservación de este recurso ya que no se debe olvidar que inclusive en muchos casos este es considerado como no renovable.

Al mencionar una política de operación conjunta presa-acuífero, es necesario que el modelo de optimización considere de alguna manera las preferencias de utilizar fuentes superficiales o subterráneas, las cuales pueden ser variables de acuerdo con la época del año.

Con respecto al acuífero, es posible simular su funcionamiento utilizando la ecuación de continuidad (4.2) como:

$$V_f = V_i + RA - DA \quad (4.3)$$

donde V_f y V_i son los volúmenes que almacena el acuífero al final e inicio del período de interés.

Las entradas netas al acuífero pueden estar constituidas por filtración en canales, filtraciones por riego en exceso y filtraciones procedentes de aguas meteóricas. Las dos primeras se pueden considerar constantes por temporada; la tercera tiene asociada las probabilidades de ocurrencia de la lluvia.

En cuanto a las salidas, entre otras se cuentan, extracción para surtir la demanda, descargas no controladas que dependen del nivel

(estado) del almacenamiento medio en el acuífero y los derrames, que pueden considerarse como salidas en aquellos lugares en donde a consecuencia del elevado nivel del agua, se producen brotes de agua a nivel del terreno.

Los volúmenes inicial y final pueden ser relacionados con una curva elevaciones-capacidades, restringida por una elevación máxima y mínima, asociando en su caso derrames o déficit mediante un proceso totalmente similar al descrito para una presa de almacenamiento.

4.3 ANTECEDENTES

Hasta el momento no es mucho el esfuerzo que se ha realizado con miras a definir políticas de operación conjuntas en sistemas complejos de almacenamiento. Es notable la similitud del problema de dos presas en paralelo o en cascada^[9] con el de presa-acuífero, siendo este último el menos abordado debido a la mayor "popularidad" del sector hidroeléctrico y al mayor acceso a los datos necesarios en la definición y solución del problema.

En los grandes sistemas hidroeléctricos mexicanos, se han tratado de implantar políticas de operación que mejoren su aprovechamiento, por ejemplo en 1984 se analizó el sistema de presas en cascada Infiernillo-La Villita, ubicado sobre el río Balsas^[10]; en este caso se condicionó el funcionamiento de la presa La Villita al de la presa

Infiernillo, dada la poca capacidad y ubicación de la primera. A pesar de que no fué necesario realizar un análisis conjunto, se presenta en este trabajo una revisión bibliográfica con relación al tema.

Posteriormente, en 1988, el Instituto de Ingeniería se dió a la tarea de determinar políticas de operación a nivel mensual para el sistema hidroeléctrico de 4 presas en cascada del río Grijalva⁽¹⁷⁾, ubicadas hacia el sureste de la república. En esta ocasión se supuso con base en las condiciones normales de funcionamiento, que dos de ellas operan con poca variación en los niveles medios mensuales, por lo cual fué desarrollada una metodología para definir los volúmenes de extracción simultáneos en las dos restantes, en función del estado de cada una al inicio de periodos mensuales, pero considerando para ello la energía generada por todo el sistema. El modelo desarrollado tiene sus bases teóricas en el esquema de la programación dinámica estocástica.

Con respecto al sistema presa-acuífero, el mejor esfuerzo realizado en México para abordar el problema que plantea el manejo conjunto de aguas superficiales y subterráneas, fué desarrollado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos⁽¹⁵⁾. En virtud de que este planteamiento es casi el único desarrollado, se resume brevemente en este inciso su esquema metodológico.

El planteamiento general del procedimiento contempla dos fases; en la

primera se determina la política de operación de la presa y se definen las probabilidades estacionarias del almacenamiento discretizado¹⁵⁾. Estas probabilidades representan la función de densidad de probabilidad (π_j) de los niveles (j) de la presa en el largo plazo y se calculan como:

$$\pi_j = \pi_j * P_m^k \quad (4.4)$$

donde P representa la matriz de transición de estados, correspondiente a la política, comentada en el inciso 3.5.

Si la variable aleatoria X representa las extracciones a la presa y se conocen los valores del vector π_j , es posible definir la función de densidad de probabilidad de las extracciones como:

$$P = P(X = x_j) = \pi_j \quad (4.5)$$

La anterior expresión, señala que la probabilidad de extraer un volumen x_j (políticas de operación), es equivalente a la probabilidad de mantener el nivel j de almacenamiento en el largo plazo.

Se requiere ahora asociar a cada valor de la variable aleatoria X , un valor de la variable aleatoria Y , que representa las extracciones, y_j , del acuífero, para cada nivel j de almacenamiento en la presa. Si

a cada valor y_j se le asocia la misma probabilidad P_j , indica que las variables aleatorias X e Y , tienen la misma función de densidad de probabilidad, o sea que:

$$P_j = P(X = x_j) = P(Y = y_j) \quad ; \text{ para toda } j \in \text{DELTA} \quad (4.6)$$

en la que DELTA es el conjunto de niveles de la presa en los que se desea usar paralelamente el acuífero. Termina con esta asignación la primera fase.

En la segunda fase se calculan las extracciones del acuífero, asociadas a los niveles críticos del almacenamiento en la presa, cumpliendo la restricción:

$$E(Y) = \sum_j y_j * P_j = R \quad (4.7)$$

La expresión (4.7) indica que el valor esperado de las extracciones del acuífero ($E(Y)$), no debe rebasar el volumen de recarga (R) del mismo. También se restringe por la capacidad de bombeo instalada en el acuífero. En general esta fase consiste en determinar las parejas (x_j, y_j) correspondientes a cada nivel j de almacenamiento en la presa.

Este método tiene diversas desventajas derivadas de las

simplificaciones utilizadas, entre ellas se mencionan:

. En muchos casos es demasiado severa y forzada, la asignación de la función de densidad de probabilidad estacionaria de los niveles de la presa a las extracciones que deben tener lugar en el acuífero.

. Debido a que el proceso no incluye el funcionamiento del acuífero, no toma en cuenta sus niveles mínimo y máximo de operación; esto podría redundar en niveles indeseables en el almacenamiento de agua subterránea.

. La preferencia es total hacia el uso del agua superficial, dejando inactivo el acuífero en niveles elevados de la presa. Esta acción, al igual que la anterior, puede acarrear en el funcionamiento real del acuífero, niveles indeseados ya que en muchas situaciones se requiere un drenaje vertical constante para mantenerlo en los niveles adecuados.

Actualmente se puede afirmar que en la generalidad de los casos, las políticas de operación de sistemas presa-acuífero son manejadas en forma independiente para cada componente, proponiendo normas de funcionamiento en cada una y recurriendo a los procesos de simulación para seleccionar la mejor alternativa; el éxito de este tipo de operación depende en mucho de la pericia y experiencia del ingeniero que la realiza.

4.4 ESQUEMA ECONOMICO DE COSTOS Y BENEFICIOS NETOS CONSIDERADOS

Al analizar sistemas hidráulicos complejos , como es el caso de dos presas en paralelo, es importante aclarar que la zona de demanda a la que sirve se considera como una sola; motivo por el cual la estructura de costos y beneficios planteada en el capítulo 3, se conserva similar para la situación que se desea analizar. En este caso se necesita considerar que los volúmenes reportados en la función de beneficios (ver figuras 3.1, 3.2 y 3.3) es la suma de las extracciones de ambas presas.

Es posible considerar diferentes costos de penalización del derrame en las presas (ecuaciones (3.3) y (3.5)), ya que puede darse el caso en que las zonas de protección correspondientes, a cada una sean diferentes en magnitud y uso; por ejemplo, puede ocurrir que una de las presas proteja un complejo industrial situado aguas abajo y la otra deba proteger una pequeña zona agrícola, en cuyo caso se pueden asignar mayores o menores costos por derrames en cada una, dependiendo de la jerarquía e importancia de las obras que requieren su protección. Es común encontrar situaciones en las cuales un sistema de presas deben proteger poblaciones urbanas de los estragos que ocasionan grandes avenidas generadas aguas arriba.

La penalización por volumen prometido y no entregado (déficit) a la zona de demanda es dada por las ecuaciones (3.2) o (3.4).

Con base en los comentarios y análisis realizado, se plantea una nueva estructura de los beneficios netos, válido para un sistema de dos presas en paralelo, con origen en la ecuación (3.6) y dada por:

$$b_n^{k_n^I k_n^{II}}(\bar{V}_n^I, V_n^{II}) = G_n^{k_n^I k_n^{II}}(\bar{V}_n^I, V_n^{II}) - C_{D_n}(V_{D_n}) - C_{A_n}^I(V_{A_n}^I) - C_{A_n}^{II}(V_{A_n}^{II}) - C_c^I * k_n^I - C_c^{II} * k_n^{II} \quad (4.8)$$

Los superíndices i e II, se refieren a las presas 1 y 2, respectivamente, el significado de las variables es similar al descrito en la ecuación (3.6) con las aclaraciones:

$b_n^{k_n^I k_n^{II}}$ beneficio neto en la etapa n, por entregar un volumen total $k_n^I + k_n^{II}$ a la zona de demanda

C_c^x costo por conducir un volumen unitario desde la presa x, a la zona de demanda

k_n^x volumen entregado por la presa x, a la zona de demanda

Como puede observarse en la expresión (4.8), los beneficios dependen de los niveles medios de almacenamiento alcanzados en cada una de las presas durante la etapa n y del volumen entregado por cada una.

4.5 MODELO DE ASIGNACION DE AGUA ESTACIONAL

Se plantea en el presente inciso un modelo de optimización en la operación conjunta de presas en paralelo. Este modelo considera, similarmente al descrito en los incisos 3.2 y 3.4, la maximización de los beneficios netos obtenidos de la producción agrícola en una zona de riego.

Las restricciones que se plantean son por capacidad de cada presa, potencial de extracción y ecuaciones de balance hidráulico en cada una.

Con base en las características y estructura del modelo, es posible estudiar el comportamiento en el largo plazo de políticas de operación, utilizando posteriormente la técnica de programación dinámica estocástica.

El planteamiento del modelo hidroeconómico para dos presas en paralelo, considerando dos etapas anuales es el siguiente:

$$\max_{K_1, K_2} Z = E_x \left\{ \sum_{i=1}^N \beta^i [b_1(K_1^I, K_1^{II}, \bar{V}_1^I, \bar{V}_1^{II}) + \beta^{\frac{1}{2}} * b_2(K_2^I, K_2^{II}, \bar{V}_2^I, \bar{V}_2^{II})] \right\} \quad (4.9)$$

sujeto a las restricciones

$$V_{F_1}^I = V_1^I + X_1^I - K_1^I$$

$$V_{F_2}^I = V_{F_1}^I + X_2^I - K_2^I$$

$$V_{F_1}^{II} = V_{I_1}^{II} + X_1^{II} - K_1^{II}$$

$$V_{F_2}^{II} = V_{I_1}^{II} + X_2^{II} - K_2^{II}$$

$$V_m^I \leq \bar{V}^I \leq V_u^I$$

$$V_m^{II} \leq \bar{V}^{II} \leq V_u^{II}$$

$$0 \leq K^I \leq (V_v^I + V_{ot}^{II})$$

$$0 \leq K^{II} \leq (V_v^{II} + V_{ot}^{II})$$

El significado de cada variable coincide con el descrito en el inciso 3.3 de esta tesis, tomando en cuenta únicamente que los superíndices corresponden a los datos de cada una de las presas que integran el sistema. El doble subíndice de los volúmenes (V) indican el almacenamiento inicial (I) y final (F), en los periodos 1 y 2.

Si se desea analizar el sistema presa-acuífero, basta considerar el volumen de recarga estacional como entrada al acuífero y la restricción por capacidad de bombeo instalada en lugar de la capacidad de la obra de toma; el volumen activo de almacenamiento sería el similar de la capacidad útil de la presa.

4.6 APLICACION DE LA PROGRAMACION DINAMICA ESTOCASTICA AL PROBLEMA DE DOS PRESAS EN PARALELO

El problema de dos presas en paralelo es claramente abordable con el esquema de la programación dinámica estocástica, en este caso los estados del sistema se conforman por todas las posibles combinaciones de niveles de almacenamiento en ambas, resultado posterior a la discretización del volumen útil de cada una. Las posibles decisiones de extracción al sistema, están formadas por el conjunto de pares combinados que indican la salida de cada presa de manera simultánea; el conjunto de decisiones se construye con los volúmenes de extracción de cada embalse, una vez discretizados siguiendo el procedimiento antes descrito.

Dada la similitud que existe con el problema de una sola presa, desarrollado en el capítulo 3; en este apartado se plantea directamente la ecuación recursiva final de la programación dinámica estocástica, que aplicada al sistema de dos presas en paralelo resulta:

$$B_m^N(i_I, i_{II}) = \gamma_m^{k_I k_{II}} B_m^N(i_I, i_{II}) + \sum_{j_I, j_{II}} p_m^{k_I k_{II}}(i_I, i_{II}, j_I, j_{II}) * B_m^V(j_I, j_{II})$$

en la cual:

(4.10)

$p_m^{k_I k_{II}}(i_I, i_{II}, j_I, j_{II})$ representa en conjunto la función de densidad

de probabilidad de los volúmenes de entrada al sistema de presas. Particularmente indica la probabilidad durante la etapa m, de pasar del nivel de almacenamiento inicial i_I , al nivel final j_I , en la presa 1, y del inicial i_{II} , al final j_{II} , en la presa 2; bajo extracciones simultáneas k_m^I y k_m^{II} en cada una, respectivamente.

$\gamma_m^{k_m^I k_m^{II}}(i_I, i_{II})$ beneficio inmediato esperado si el estado del sistema al inicio de la etapa m es (i_I, i_{II}) , y se extraen simultáneamente los volúmenes k_m^I en la presa 1 y k_m^{II} en la presa 2.

El beneficio inmediato esperado es dado por la ecuación (3.25), considerando el sistema analizado queda como:

$$\gamma_m^{k_m^I k_m^{II}}(i_I, i_{II}) = \sum_{j_I, j_{II}} p_m^{k_m^I k_m^{II}}(i_I, i_{II}, j_I, j_{II}) * b_m^{k_m^I k_m^{II}}(i_I, i_{II}, j_I, j_{II})$$

(4.11)

El beneficio obtenido en la transición del sistema (b_m) durante la etapa m, se calcula utilizando la expresión (4.8).

$B_m^N(i_I, i_{II})$ es el beneficio neto óptimo, obtenido de la operación del sistema, para el estado (i_I, i_{II}) .

La secuencia de aplicación de la ecuación (4.10) con miras a obtener

políticas de operación conjunta en el sistema de dos presas en paralelo, es la descrita en el inciso 3.5 del capítulo anterior; solo es necesario considerar la conversión

$$i \rightarrow i_I, i_{II}$$

en la cual el índice i representa la combinación de los estados particulares (i_I, i_{II}) de ambas presas.

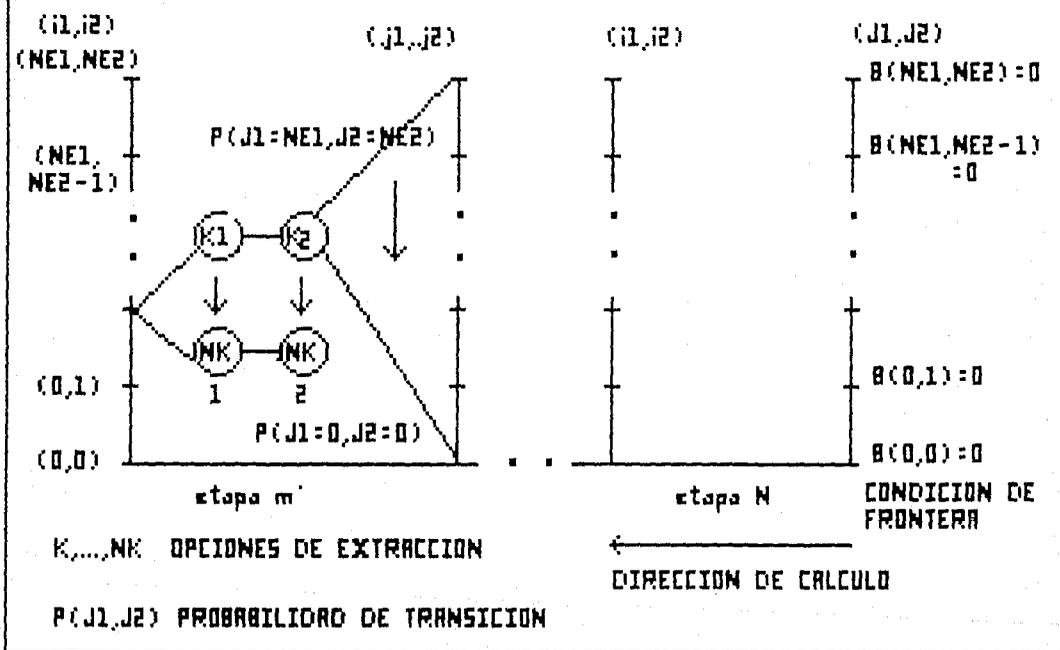
Cabe aclarar que debido a que se considera independencia probabilística de escurrimientos, los cálculos de la matriz de transición para cada alternativa de extracción pueden realizarse individualmente en cada una siguiendo el procedimiento descrito en el inciso 3.5; el resultado deseado es la multiplicación de dichas probabilidades de manera que:

$$p_m^{k^I k^{II}}(i_I, i_{II}, j_I, j_{II}) = p_m^{k^I}(i_I, j_I) * p_m^{k^{II}}(i_{II}, j_{II}) \quad (4.12)$$

Es así como los cálculos hidrológicos pueden realizarse independientemente, con la metodología descrita en el capítulo 3. El cálculo de beneficios sí debe hacerse en forma conjunta ya que los beneficios se generan por las características que presenta el sistema a nivel general.

En la figura 4.3 se esquematiza la aplicación de la programación dinámica estocástica al problema de dos presas en paralelo. El

FIG 4.3 ESQUEMA DE LA PROGRAMACION DINAMICA ESTOCASTICA - 2 PRESAS



superíndice es un ordinal con base en la partición de los almacenamientos de las presas, NS1 y NS2 son el máximo almacenamiento discretizado de cada presa. k1 y k2 representan las combinaciones de extracción factibles.

Como punto final es importante destacar que al aplicar programación dinámica estocástica en sistemas de presas, se realizan en primer lugar variadas simplificaciones, las cuales pueden alejar al modelo de la situación real. Para de alguna manera corregir esta limitación, es necesario complementar los estudios de optimización con otros de simulación⁽²⁾, en los cuales se refleje la sensibilidad del sistema frente a la política de operación; esta acción permite además conocer el nivel deficitario que impondría la política a la ley de demandas particular de cada problema.

5. EJEMPLOS DE APLICACION

Con miras a utilizar los planteamientos descritos en los capítulos 3 y 4, fué escrito un programa en lenguaje Fortran, el cual fué probado con los ejemplos contenidos en el presente capítulo. El primer ejemplo se refiere a un sistema hipotético de presas; el objetivo en este caso es demostrar algunos procedimientos importantes en la determinación de una política de operación. En el segundo ejemplo se describe la manera en que se aplicó el método a un problema real complejo, de manejo conjunto de aguas superficiales y subterráneas.

5.1 POLITICA DE OPERACION DE UN SISTEMA HIPOTETICO DE DOS PRESAS QUE ABASTECEN A UN DISTRITO DE RIEGO

Considérese un sistema de dos presas de almacenamiento en paralelo, cuya función es suministrar la demanda agrícola requerida por un distrito de riego. Las presas tienen 750 Mm^3 de capacidad útil cada

una. La presa 1 puede descargar anualmente un volumen de 500 Mm^3 , no así la presa 2, en la cual la capacidad máxima de descarga está limitada a 1000 Mm^3 .

Se considera en este ejemplo una sola etapa anual; si se elige como módulo de discretización un ΔV de 250 Mm^3 , las funciones de densidad de probabilidad de los volúmenes de entrada a cada presa son tipificadas por:

#	VECES ΔV	PROBABILIDAD	
		PRESA 1	PRESA 2
1		0.255	0.604
2		0.520	0.243
3		0.092	0.092
4		0.061	0.061
5		0.060	
6		0.012	

La discretización de la capacidad útil en cada una de la presas, siguiendo la nomenclatura de los capítulos 3 y 4 es:

$$NE1 = NE2 = 750/250 = 3$$

Y para las extracciones:

$$NK1 = 500/250 = 2$$

$$NK2 = 1000/250 = 4$$

Los cálculos anteriores definen un total de 9 alternativas en cuanto a los estados del sistema y de 8 posibles opciones de extracciones simultáneas al sistema. El programa de cómputo desarrollado considera además las alternativas cero, esto es, presas vacías y extracción nula, por lo cual se analizan un total de 16 posibles estados del sistema y 15 opciones de extracción simultánea.

Con respecto a la zona de demanda, esta requiere un volumen anual promedio del orden de 1250 Mm^3 , o sea 5 veces el ΔV seleccionado.

El esquema de costos propuesto es bastante sencillo, dado que el objetivo de este ejemplo es mostrar algunas características de la metodología expuesta. La función de beneficios utilizada es del tipo mostrado en las figuras 3.2 y 3.3 con ordenada al origen de -10 (variable "kon" del programa) y valor de la demanda total de 100 unidades monetarias. Los costos unitarios por déficit en la entrega y derrames se consideran iguales a 1; sin embargo al suponer que la presa 2 se encuentra más lejana del sitio de entrega, se asignan costos de conducción de 1 y 10 unidades monetarias para las presas 1 y 2, respectivamente. El costo de conducción desde la presa 2 se puede considerar como el reflejo del costo que ocasiona bombear el agua desde la ubicación de la presa hasta el distrito de riego.

Si se detalla un poco más el volumen de cálculos necesarios, se deduce el conjunto de alternativas de estados del sistema:

$$(k^I, k^{II}) = \left[\begin{array}{l} (0,0), (0,1), (0,2), (0,3), \\ (1,0), (1,1), (1,2), (1,3), \\ (2,0), (2,1), (2,2), (2,3), \\ (3,0), (3,1), (3,2), (3,3) \end{array} \right] \quad (i)$$

Y el conjunto de posibles extracciones simultáneas:

$$(k^I, k^{II}) = \left[\begin{array}{l} (0,0), (0,1), (0,2), (0,3), (0,4), \\ (1,0), (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), \\ (2,0), (2,1), (2,2), (2,3), (2,4) \end{array} \right] \quad (ii)$$

Lo cual indica que se generan 15 matrices de transición de los estados del sistema, conjunto (i), correspondientes a cada pareja de extracción del conjunto (ii). Este hecho hace sentir la magnitud severa del problema cuando se desea dividir la capacidad útil de una presa en muchos estados de discretización, o lo que es igual, usar un ΔV demasiado pequeño.

Los datos descritos fueron procesados haciendo uso del programa de cómputo, definiendo de esta manera las matrices de transición y de beneficios; de estos resultados se presentan las alternativas de la segunda fila del conjunto (ii), además de la política de operación óptima (ver tablas 5.3 y 5.4).

A continuación se procede a detallar el cálculo de la probabilidad de transición para algunos casos especiales de condiciones críticas dentro del ejemplo planteado. Antes se define la función de densidad

de probabilidad conjunta de los escurrimientos de entrada al sistema de presas.

Según la función de densidad de probabilidad reportada en forma particular para cada presa, los posibles volúmenes de entrada (discretizados) en cada una son de 6 en la presa 1, y 4 en la presa 2. Ello da la pauta para crear las probabilidades conjuntas $P(X_1=x_1, X_2=x_2)$, donde X_1 y X_2 representan las variables aleatorias de los escurrimientos de entrada en cada una; las posibles combinaciones de entrada y su probabilidad asociada se presentan en la tabla 5.1.

TABLA 5.1 PROBABILIDADES CONJUNTAS (ecuación 4.12)

ENTRADAS	PROBABILIDAD CONJUNTA	ENTRADAS	PROBABILIDAD CONJUNTA
(x_1, x_2)	$p(x_1, x_2)$	(x_1, x_2)	$p(x_1, x_2)$
1,1	0.154	4,1	0.037
1,2	0.062	4,2	0.015
1,3	0.023	4,3	0.006
1,4	0.015	4,4	0.004
2,1	0.314	5,1	0.036
2,2	0.126	5,2	0.015
2,3	0.048	5,3	0.006
2,4	0.032	5,4	0.004
3,1	0.055	6,1	0.007
3,2	0.022	6,2	0.003
3,3	0.008	6,3	0.001
3,4	0.006	6,4	0.001

Ahora bien, si se considera una alternativa deficitaria para la opción de extracción $(k^I, k^{II}) = (1, 3)$, como por ejemplo la transición del sistema desde el estado inicial $(i_I, i_{II}) = (0, 0)$ al final $(j_I, j_{II}) = (0, 0)$; según la tabla 5.3 la probabilidad de la misma tiene un valor de 0.239. Para verificarlo, primero se definen los volúmenes de entrada al sistema con los cuales se alcanza el estado final deseado $(0, 0)$; para ello es necesario aplicar la ecuación (3.32) a cada presa, obteniéndose los resultados siguientes:

$$q_1 = 0 - 0 + 1 = 1$$

$$q_2 = 0 - 0 + 3 = 3$$

Esto indica que si entra al sistema la pareja de volúmenes $(1, 3)$, se alcanza el estado final $(0, 0)$ deseado y se cumple con la demanda $(1, 3)$. En la presa 1, q_1 es la entrada requerida para cumplir la entrega $(k^I=1)$ y alcanzar el estado 0, y como dicho valor es la entrada mínima que presenta en su función de densidad de probabilidad, no existen otros valores en los ingresos con los cuales pueda cumplir ambas condiciones. Esto no ocurre en la presa 2, en donde la entrada que cubre su extracción $(k^{II}=3)$ resulta ser de 3 unidades discretizadas; este resultado indica (revisando su función de densidad de probabilidad) que también para entradas 2 y 1, esta presa alcanza el estado deseado 0, pero con volumen de déficit asignado a cada caso en particular.

Con base en lo anterior, para determinar la probabilidad de la transición P: (0,0) a (0,0), es necesario utilizar la ecuación (3.34), con lo cual la probabilidad buscada es:

$$P = \sum p(x_1, x_2) = p(1,3) + p(1,2) + p(1,1)$$

que según la tabla 5.1, de probabilidades conjuntas, es de 0.239 .

Para calcular el beneficio esperado, asociado a la transición analizada, es necesario recurrir a la función de beneficios propuesta:

$$G = kon + (vet/demanda) * (100-kon)$$

En la expresión anterior vet representa el volumen entregado al distrito de riego por el sistema en cada caso. Al sustituir los valores del problema se llega a:

$$G = -10 + (110/5) * vet$$

Es necesario determinar el volumen entregado por cada presa, penalizando el beneficio obtenido, G, por el costo del déficit (en este caso) y el costo en la conducción de dicho volumen hasta la zona de riego. Los cálculos se resumen en la tabla 5.2.

TABLA 5.2 RESUMEN DEL CALCULO

ENTRADAS	PROB.	VOLUMEN ENTREGADO			DEFICIT		
		PRESA 1	PRESA 2	TOTAL	PRESA 1	PRESA 2	TOTAL
(1,3)	0.023	1	3	4	0	0	0
(1,2)	0.062	1	2	3	0	1	1
(1,1)	0.154	1	1	2	0	2	2

CONTINUACION...

GANANCIA (G)	PENALIZACION (\$) POR DEFICIT	COSTO DE CONDUCCION (\$)			BENEFICIO	
		PRESA 1	PRESA 2	TOTAL	NETO	ESPERADO
78	0	1	30	31	47	1.061
56	1	1	20	21	34	2.108
34	2	1	10	11	21	3.234
					TOTAL	6.243

El beneficio esperado de la transición se calcula multiplicando en cada caso el beneficio neto por la probabilidad asociada (segunda columna). La contribución de esta transición al beneficio inmediato esperado (ecuación 4.11) en el estado del sistema (0,0), resulta ser de 6.423 unidades monetarias; el resultado final reportado en la tabla 5.3, procesando todos los posibles estados finales es de 29.61 unidades.

Debido a que la forma de cálculo de los beneficios esperados en una

transición del sistema es la misma en cualquier caso, teniendo solo cuidado al aplicar las penalizaciones correspondientes. en la opción de derrame que se analiza a continuación, solo se aborda el cálculo de la probabilidad asociada a dicha transición.

Considerando la misma alternativa de extracción anterior, pero en la transición $(i_I, i_{II}) = (1, 3)$ a $(j_I, j_{II}) = (2, 3)$; la tabla 5.3 reporta un valor de 0.08 . La aplicación de la ecuación (3.32) arroja los resultados siguientes:

$$q_1 = 2 - 1 + 1 = 2$$

$$q_2 = 3 - 3 + 3 = 3$$

La presa 1 no debe alcanzar el estado de derrame por lo cual la única opción posible para alcanzar en esta el estado final 2, es que ingrese un volumen de 2 unidades del ΔV . En cuanto a la presa 2, la entrada mínima para cubrir la demanda y alcanzar el estado final de derrame, es de 3 unidades; esto indica (ecuación 3.33) que para volúmenes de ingreso mayores (4 unidades según su función de densidad de probabilidad) también podrá ser alcanzado el mismo estado final; obviamente se presentará el derrame del volumen excedente. Con base en lo anterior la probabilidad P deseada es la suma de las probabilidades conjuntas:

$$P = \sum p(x_1, x_2) = p(2, 3) + p(2, 4)$$

que según valores de la tabla 5.1 resulta ser de 0.08 .

El programa realiza estos cálculos tantas veces como estados y alternativas de extracción se tengan, generando 15 matrices de transición y 15 vectores de beneficios inmediatos esperados.

Posterior a esta fase se entra a la aplicación de la programación dinámica estocástica, en la que se aplica sucesivamente, para cada estado y cada alternativa de extracción, la ecuación recursiva (4.10), siguiendo el procedimiento descrito en el inciso 3.5. La política de operación resultante se reporta en la tabla 5.4 . En ella es claramente observable que para niveles de almacenamiento bajos en ambos almacenamientos, con la estructura de costos utilizada, el sistema de presas no debe prometer el suministro de la demanda.

La forma de interpretar la política es muy sencilla, así por ejemplo si las decisiones de extracción anual se toman el 1° de Enero, y en ese momento la presa 1 está vacía y la presa 2 tiene almacenados 250 Mm^3 en la capacidad útil, la política de operación obtenida indica que debe prometerse a los agricultores un suministro de 1000 Mm^3 durante el año, 500 Mm^3 por cada presa. Si ambas están vacías se deben prometer 500 Mm^3 de la presa 1 y 250 Mm^3 de la 2, con la opción de poder anticipar los efectos que este déficit impondrá en las actividades agrícolas.

Es posible realizar algunos análisis de sensibilidad con respecto a la política resultante, al variar la estructura de costos propuesta en el ejemplo. Así, el costo de conducción desde la presa 2, fué alterado hasta un valor de 4 u.m. , resultando políticas de operación similares a la reportada. Para valores menores, la política se estabiliza hacia el uso equilibrado de ambos almacenamientos.

Si se incrementa a 100 u.m. el costo unitario del derrame en ambas presas, la política resultante tiende a extraer, sobre todo en niveles altos de almacenamiento, la capacidad máxima de salida, esto es, 500 y 1000 Mm³ respectivamente en cada una (ver tabla 5.5). Este hecho incluye el extraer un volumen mayor que el demandado por el distrito y su explicación es bastante sencilla, ya que con ello se tratan de evitar los posibles derrames que puedan tener lugar por las obras de excedencia de las presas.

En otra situación analizada se incrementó en la estructura original de costos, el valor de penalización unitaria por déficit a 100 u.m.; en este caso es notable la disminución del volumen de agua prometido, en especial cuando el nivel de almacenamiento del sistema es bajo (ver tabla 5.6). Esta acción genera en la operación de las presas un menor déficit asociado al volumen prometido de entrega, al inicio del ciclo anual.

Una alternativa interesante resulta el verificar que ocurre en caso de ampliar de 500 a 750 Mm³, la capacidad de descarga de la presa 1. Los resultados, consignados en la tabla 5.7, indican que se debe disminuir la utilización del agua de la presa 2; esto era de esperarse, dado que el costo unitario de conducción desde esta es mayor que el asignado a la conducción desde la presa 1.

La variación de los parámetros que intervienen en una estructura de costos particular debe realizarse con sumo cuidado, tratando de no alejar a esta de la realidad. Es muy importante conservar la jerarquía que guardan, lo que quiere decir que dicha estructura debe reflejar las preferencias del organismo operador de la presa, la base económica del distrito de riego en cuanto a las ganancias obtenidas por la entrega de volúmenes de agua, las posibles pérdidas económicas por derramar agua y por la falta del líquido originalmente prometido para suministro, etc.

**TABLA 5.3 MATRICES DE TRANSICION Y VECTOR DE BENEFICIOS INMEDIATOS ESPERADOS
 PARA LAS ALTERNATIVAS DE EXTRACCION (1,0,.....N,2)**

BENEFICIO ESPERADO	EXTRACCION PRESA 1=				1 ^a dV				EXTRACCION PRESA 2=				0 ^a dV				
	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,0)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	
10.855	(0,0)	.000	.154	.062	.039	.000	.314	.126	.080	.000	.056	.022	.014	.000	.000	.032	.020
10.701	(0,1)	.000	.000	.154	.101	.000	.000	.314	.206	.000	.056	.036	.000	.000	.000	.000	.053
10.306	(0,2)	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.520	.000	.000	.000	.092	.000	.000	.000	.133
9.306	(0,3)	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.520	.000	.000	.000	.052	.000	.000	.000	.133
10.722	(1,0)	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.039	.000	.314	.126	.080	.000	.136	.055	.034
10.569	(1,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.101	.000	.000	.314	.206	.000	.000	.136	.089
10.173	(1,2)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.520	.000	.000	.000	.225
9.173	(1,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.520	.000	.000	.000	.225
10.497	(2,0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.039	.000	.450	.181	.114
10.344	(2,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.101	.000	.000	.450	.295
9.948	(2,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.745
8.948	(2,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.745
9.752	(3,0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.604	.243	.153
9.599	(3,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.604	.396	
9.203	(3,2)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	1.000	
8.203	(3,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	1.000	

BENEFICIO ESPERADO	EXTRACCION PRESA 1=				1 ^a dV				EXTRACCION PRESA 2=				1 ^a dV					
	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,0)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)		
22.916	(0,0)	.154	.062	.023	.016	.314	.126	.049	.032	.056	.022	.003	.006	.080	.032	.012	.008	
22.855	(0,1)	.000	.154	.062	.039	.000	.314	.126	.080	.000	.056	.022	.014	.000	.086	.032	.020	
21.702	(0,2)	.000	.000	.154	.101	.000	.000	.314	.206	.000	.000	.056	.036	.000	.000	.080	.073	
21.306	(0,3)	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.520	.000	.000	.000	.092	.000	.000	.000	.133	
22.783	(1,0)	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.023	.016	.314	.126	.049	.032	.136	.055	.021	.014	
22.722	(1,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.039	.000	.314	.126	.080	.000	.136	.055	.034	
22.569	(1,2)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.101	.000	.000	.314	.206	.000	.000	.136	.089	
22.173	(1,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.520	.000	.000	.000	.225	
22.858	(2,0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.039	.016	.450	.181	.045	
22.497	(2,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.039	.000	.450	.114	
22.344	(2,2)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.745	
21.948	(2,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.745	
21.813	(3,0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.604	.243	.092	.061
21.752	(3,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.604	.243	.153	
21.599	(3,2)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.604	.396	
21.203	(3,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	1.000	

BENEFICIO ESPERADO	EXTRACCION PRESA 1=				1 ^a dV				EXTRACCION PRESA 2=				2 ^a dV					
	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,0)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)		
27.905	(0,0)	.216	.023	.016	.000	.440	.048	.032	.000	.078	.008	.006	.000	.113	.012	.008	.008	
34.916	(0,1)	.154	.062	.023	.016	.314	.126	.049	.032	.056	.022	.008	.006	.080	.032	.012	.008	
34.855	(0,2)	.000	.154	.062	.039	.000	.314	.126	.080	.000	.056	.022	.014	.000	.080	.032	.020	
34.702	(0,3)	.000	.000	.154	.101	.000	.000	.314	.206	.000	.000	.056	.036	.000	.000	.080	.073	
27.822	(1,0)	.000	.000	.000	.000	.216	.023	.016	.000	.440	.048	.032	.000	.191	.021	.014	.006	
34.783	(1,1)	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.023	.016	.314	.126	.049	.032	.136	.055	.021	.014	
34.722	(1,2)	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.039	.000	.314	.126	.080	.000	.136	.055	.034	
34.569	(1,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.101	.000	.000	.314	.206	.000	.000	.136	.089	
28.064	(2,0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.216	.023	.016	.000	.631	.069	.045	.000
34.558	(2,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.023	.016	.450	.181	.069	.045
34.497	(2,2)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.039	.000	.450	.181	.114
34.344	(2,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.450	.295
33.321	(3,0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.847	.092	.061	.000
33.813	(3,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.604	.243	.092	.061
33.752	(3,2)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.604	.243	.153	
33.599	(3,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.604	.396	

BENEFICIO ESPERADO	EXTRACCION PRESA 1=					1ª dV								EXTRACCION PRESA 2=				3ª dV			
	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,0)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)					
29.558	(0,0)	.223	.016	.000	.000	.488	.032	.000	.000	.086	.006	.000	.000	.125	.008	.006	.000				
39.965	(0,1)	.216	.023	.016	.000	.440	.048	.032	.000	.078	.006	.006	.000	.113	.012	.008	.000				
46.916	(0,2)	.154	.062	.023	.016	.314	.126	.048	.032	.056	.022	.008	.006	.080	.032	.012	.008				
46.855	(0,3)	.000	.154	.062	.039	.000	.314	.126	.080	.000	.056	.022	.014	.000	.080	.032	.020				
30.807	(1,0)	.000	.000	.000	.000	.239	.016	.000	.000	.488	.032	.000	.000	.211	.014	.000	.000				
39.822	(1,1)	.000	.000	.000	.000	.216	.023	.016	.000	.440	.048	.032	.000	.191	.021	.014	.000				
46.783	(1,2)	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.023	.016	.314	.126	.048	.032	.136	.055	.021	.014				
46.722	(1,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.039	.000	.314	.126	.080	.000	.136	.055	.034				
31.301	(2,0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.239	.016	.000	.000	.700	.045	.000	.000				
40.064	(2,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.216	.023	.016	.000	.631	.069	.045	.000				
46.558	(2,2)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.023	.016	.450	.181	.069	.045				
46.497	(2,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.039	.000	.450	.181	.114				
36.852	(3,0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.939	.061	.000	.000				
45.321	(3,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.847	.092	.061	.000				
45.813	(3,2)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.604	.243	.092	.061				
45.752	(3,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.604	.243	.153				

BENEFICIO ESPERADO	EXTRACCION PRESA 1=					1ª dV								EXTRACCION PRESA 2=				4ª dV			
	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,0)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)					
29.610	(0,0)	.235	.000	.000	.000	.520	.000	.000	.000	.092	.000	.000	.000	.133	.000	.000	.000				
41.558	(0,1)	.239	.016	.000	.000	.488	.032	.000	.000	.086	.006	.000	.000	.125	.008	.000	.000				
51.905	(0,2)	.216	.023	.016	.000	.440	.048	.032	.000	.078	.008	.006	.000	.113	.012	.008	.000				
56.916	(0,3)	.154	.062	.023	.016	.314	.126	.048	.032	.056	.022	.008	.006	.080	.032	.012	.008				
31.881	(1,0)	.000	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.520	.000	.000	.000	.225	.000	.000	.000				
42.807	(1,1)	.000	.000	.000	.000	.239	.016	.000	.000	.488	.032	.000	.000	.211	.014	.000	.000				
51.822	(1,2)	.000	.000	.000	.000	.216	.023	.016	.000	.440	.048	.032	.000	.191	.021	.014	.000				
58.783	(1,3)	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.023	.016	.314	.126	.048	.032	.136	.055	.021	.014				
34.421	(2,0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.255	.000	.000	.000	.745	.000	.000	.000				
43.301	(2,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.239	.016	.000	.000	.700	.045	.000	.000				
52.064	(2,2)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.023	.016	.631	.069	.045	.000				
58.558	(2,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.154	.062	.023	.016	.450	.181	.069	.045			
44.316	(3,0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	1.000	.000	.000	.000				
51.652	(3,1)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.939	.061	.000	.000				
57.321	(3,2)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.847	.092	.061	.000				
57.813	(3,3)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.604	.243	.092	.061				

TABLA 5.4 POLITICA DE OPERACION OPTIMA DEL EJEMPLO 1

ESTADO Mm3		EXTRACCION Mm3		BENEFICIO ESPERADO UNID. MONET.
PRESA 1	PRESA 2	PRESA 1	PRESA 2	
.00	.00	500.00	250.00	38.38
.00	250.00	500.00	500.00	50.38
.00	500.00	500.00	750.00	62.38
.00	750.00	500.00	750.00	62.53
250.00	.00	500.00	500.00	48.90
250.00	250.00	500.00	750.00	60.90
250.00	500.00	500.00	750.00	67.92
250.00	750.00	500.00	750.00	67.85
500.00	.00	500.00	750.00	51.81
500.00	250.00	500.00	750.00	60.82
500.00	500.00	500.00	750.00	67.78
500.00	750.00	500.00	750.00	67.72
750.00	.00	500.00	750.00	52.30
750.00	250.00	500.00	750.00	61.06
750.00	500.00	500.00	750.00	67.56

TABLA 5.5 POLITICA DE OPERACION OPTIMA DEL EJEMPLO 1
INCREMENTANDO EL COSTO POR DERRAME

ESTADO Mm3		EXTRACCION Mm3		BENEFICIO ESPERADO UNID. MONET.
PRESA 1	PRESA 2	PRESA 1	PRESA 2	
.00	.00	500.00	750.00	54.41
.00	250.00	500.00	750.00	70.99
.00	500.00	500.00	750.00	82.19
.00	750.00	500.00	750.00	77.96
250.00	.00	500.00	750.00	59.55
250.00	250.00	500.00	750.00	72.96
250.00	500.00	500.00	750.00	80.60
250.00	750.00	500.00	750.00	74.50
500.00	.00	500.00	750.00	58.61
500.00	250.00	500.00	750.00	67.97
500.00	500.00	500.00	750.00	67.30
500.00	750.00	500.00	750.00	61.20
750.00	.00	500.00	1000.00	49.83
750.00	250.00	500.00	1000.00	48.73
750.00	500.00	500.00	1000.00	48.65
750.00	750.00	500.00	1000.00	41.80

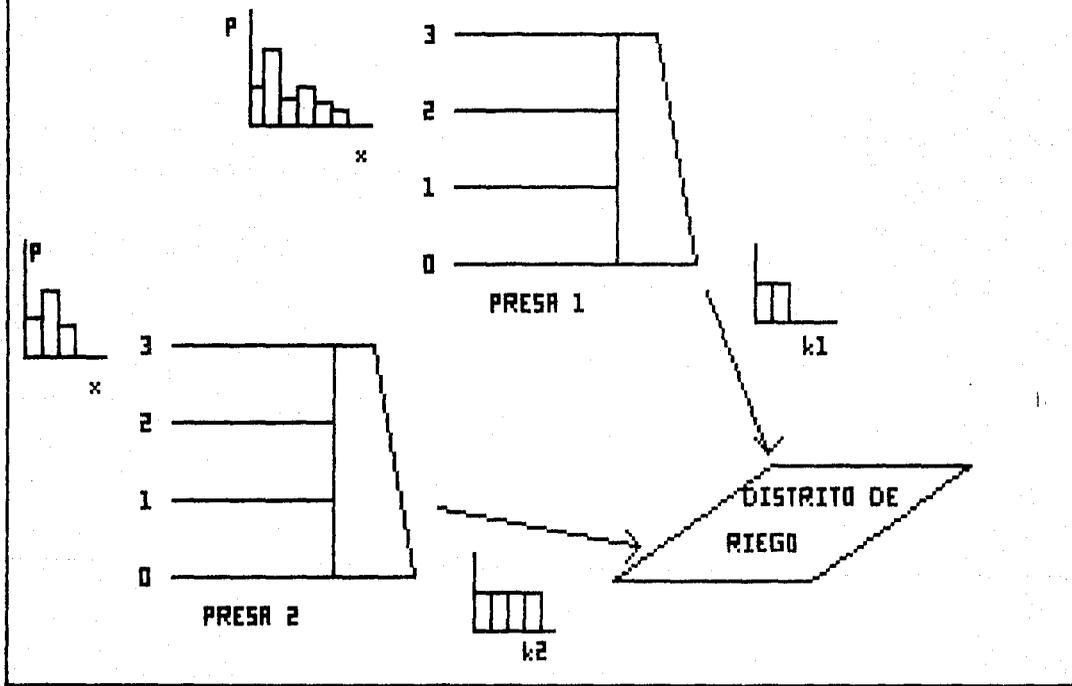
TABLA 5.6 POLITICA DE OPERACION OPTIMA DEL EJEMPLO 1
INCREMENTANDO EL COSTO POR DEFICIT

ESTADO Mm3		EXTRACCION Mm3		BENEFICIO ESPERADO UNID.MONET.
PRESA 1	PRESA 2	PRESA 1	PRESA 2	
.00	.00	250.00	250.00	29.92
.00	250.00	250.00	500.00	48.92
.00	500.00	250.00	750.00	67.92
.00	750.00	250.00	1000.00	86.92
250.00	.00	500.00	250.00	50.92
250.00	250.00	500.00	500.00	69.92
250.00	500.00	500.00	750.00	88.92
250.00	750.00	500.00	750.00	88.85
500.00	.00	500.00	250.00	50.78
500.00	250.00	500.00	500.00	69.78
500.00	500.00	500.00	750.00	88.78
500.00	750.00	500.00	750.00	88.72
750.00	.00	500.00	250.00	50.56
750.00	250.00	500.00	500.00	69.56
750.00	500.00	500.00	750.00	88.56
750.00	750.00	500.00	750.00	88.50

TABLA 5.7 POLITICA DE OPERACION OPTIMA DEL EJEMPLO 1
MODIFICANDO LA CAPACIDAD DE DESCARGA DE LAS PRESAS

ESTADO Mm3		EXTRACCION Mm3		BENEFICIO ESPERADO UNID.MONET.
PRESA 1	PRESA 2	PRESA 1	PRESA 2	
.00	.00	500.00	250.00	45.38
.00	250.00	500.00	500.00	64.38
.00	500.00	500.00	750.00	83.38
.00	750.00	500.00	750.00	83.64
250.00	.00	750.00	250.00	66.38
250.00	250.00	750.00	500.00	85.38
250.00	500.00	750.00	500.00	85.64
250.00	750.00	500.00	750.00	88.85
500.00	.00	750.00	500.00	79.68
500.00	250.00	750.00	500.00	90.92
500.00	500.00	750.00	500.00	90.85
500.00	750.00	750.00	500.00	90.70
750.00	.00	750.00	500.00	79.59
750.00	250.00	750.00	500.00	90.78
750.00	500.00	750.00	500.00	90.72
750.00	750.00	750.00	500.00	90.57

FIG 5.1 SISTEMA DE PRESAS DEL EJEMPLO 1



5.2 APLICACION A UN CASO REAL

La metodología expuesta se aplicó al sistema complejo de almacenamiento: presa La Boquilla - presa Francisco I. Madero - acuífero Delicias, ubicado hacia el noroeste de la República Mexicana, en el estado de Chihuahua.

El principal objetivo en este caso es manejar en forma conjunta los recursos superficiales y subterráneos de la zona, tratando de evitar en el acuífero los problemas inherentes a niveles de almacenamiento demasiado elevados, como es caso de la salinización de las tierras de cultivo del distrito de riego 05 Delicias, ubicado en el área del acuífero; proporcionando además la demanda de riego requerida.

Debido a que exponer a detalle este ejemplo, implica tratar conceptos que se salen de los objetivos de esta tesis, únicamente se trata aquí la equivalencia conceptual con respecto al sistema de presas en paralelo.

Para simplificar el problema, el almacenamiento de las presas se considera como uno solo, equivalente a la suma de las capacidades de ambas, procediendo de esta manera a determinar la política conjunta del sistema resultante: presa-acuífero.

Los datos relativos a la presa considerada son los siguientes:

Capacidad útil : 2852 Mm³

Capacidad total de las obras de toma:- 1687 Mm³/semestre

Con respecto al acuífero:

Capacidad de bombeo instalada: 1020 Mm³/semestre

Capacidad activa de almacenamiento (volumen útil): 2384 Mm³

Cabe aclarar que la capacidad activa del almacenamiento fué determinada con base en la profundidad media que presentan las cámaras de bombeo de los pozos en operación dentro del acuífero, multiplicada por el área en planta de la zona analizada y el coeficiente de almacenamiento (porosidad efectiva) de la misma.

El ciclo agrícola inicia el 1° de octubre, motivo por el cual el año fué dividido en dos periodos: seco y húmedo, caracterizados por las condiciones climáticas de cada época en particular. El periodo seco abarca entre los meses octubre-marzo y el húmedo abril-septiembre.

Las entradas a la presa hipotética se componen de los volúmenes que ingresan a las presas Boquilla y Fco I. Madero, medidas en las estaciones hidrométricas ubicadas aguas arriba de estas. Los datos de entrada desglosados por periodo se presentan en la tabla 5.8 .

TABLA 5.8 ENTRADAS A LA PRESA DE ALMACENAMIENTO (EN Mm³)

PERIODO SECO	PERIODO HUMEDO	PERIODO SECO	PERIODO HUMEDO
472.9	375.7	573.8	1352.3
89.0	478.7	434.5	1356.0
101.3	2518.3	136.4	1665.2
971.1	978.0	304.7	1356.1
616.8	1316.2	133.2	1321.3
140.6	909.9	208.5	595.5
138.5	616.5	194.6	1417.3
233.9	901.9	521.1	842.0
290.1	703.3	150.7	1353.9
127.3	702.4	400.1	1885.1
154.6	1691.8	885.1	319.2
214.1	1199.8	517.5	632.7
319.5	2765.6	298.2	2366.6
267.8	512.7	495.3	661.7
111.3	1068.6	216.4	2518.1
290.1	1102.1		

Referente a las entradas al acuífero, se cuenta con un balance de aguas subterráneas de la zona, realizado mediante la aplicación de la ecuación (4.2) a los datos geohidrológicos disponibles (período 1982-1987), sus resultados se reportan en la tabla 5.9 .

TABLA 5.9 ENTRADAS AL ACUIFERO (Mm³)

PERIODO SECO	PERIODO HUMEDO
472.6	477.3
500.0	477.6
470.0	578.9
414.3	642.1
-	752.8
-	648.0

El incremento de volumen seleccionado es de 340 Mm^3 , lo cual indica que se tendrán 8 particiones de la capacidad útil en la presa y 7 en el acuífero, lo que sumado a las alternativas cero, totalizan 72 posibles estados del sistema y 20 alternativas de extracción simultánea. La razón de no presentar las matrices de transición resultantes es obvia, pero la política obtenida se analiza posteriormente.

Los volúmenes de entrada a los almacenamientos fueron procesados, determinando la función de densidad de probabilidad empírica en cada almacenamiento y cada etapa del año, los resultados se tienen en la tabla 5.10 .

La demanda de riego considerada asciende a $2000 \text{ Mm}^3/\text{semestre}$, esto es, alrededor de 6 veces el ΔV seleccionado.

La estructura económica utilizada refleja las preferencias en el uso del recurso. En la función de beneficios propuesta la variable "kon" seleccionada, después de algunos tanteos, es de -100, y el beneficio neto de la demanda, supuesto, es de 100 unidades monetarias. La penalización unitaria del déficit por periodo se considera de 1 unidad monetaria, e igual al de derrame en la presa. En el acuífero la penalización por derrame es demasiado alta (1000 unidades monetarias por periodo), ya que se trata de evitar desbordes en éste, que en la

situación real se traduce en puntos brotantes de agua sobre la superficie del terreno. El costo en la conducción adoptado es de 10 unidades para cada almacenamiento.

Los resultados de la política se relacionan en la tabla 5.10 en la cual se encuentran también las funciones de densidad de probabilidad ajustadas.

Analizando un poco la política resultante, es observable que el acuífero debe trabajar con mayor intensidad cuando es demasiado bajo el nivel de almacenamiento en la presa, sin embargo se puede afirmar que en casi el 100% de los casos no conviene utilizar su capacidad máxima de extracción (funciona aproximadamente al 60% de su capacidad) y debido a ello se reportan beneficios negativos en dichos niveles. Cuando el acuífero se encuentra vacío al inicio del período (estado 0), se esperan entregar volúmenes del orden de 4 veces el ΔV seleccionado. En el período húmedo parece no existir problema alguno con el almacenamiento en las presas pero sí habrá algún déficit impuesto por la política, para niveles muy bajos del acuífero.

Es muy importante aclarar que las políticas no son muy sensibles a cambios realizados sobre la estructura de costos planteada originalmente, se puede decir que en términos generales existen rangos de valores para los beneficios y penalizaciones, dentro de los cuales la política resultante se mantiene constante.

TABLA 5.10 POLITICA DE OPERACION OPTIMA DEL SISTEMA PRESAS-ACUIFERO

FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD EN LA PRESA:

PERIODO SECO:

.25795 .37958 .36247

PERIODO HUMEDO:

.00684 .04351 .09947 .11756 .19649 .14924 .20615 .18075

FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD EN EL ACUIFERO:

PERIODO SECO:

1.00000

PERIODO HUMEDO:

.15351 .84649

POLITICA DE OPERACION OPTIMA ETAPA 1

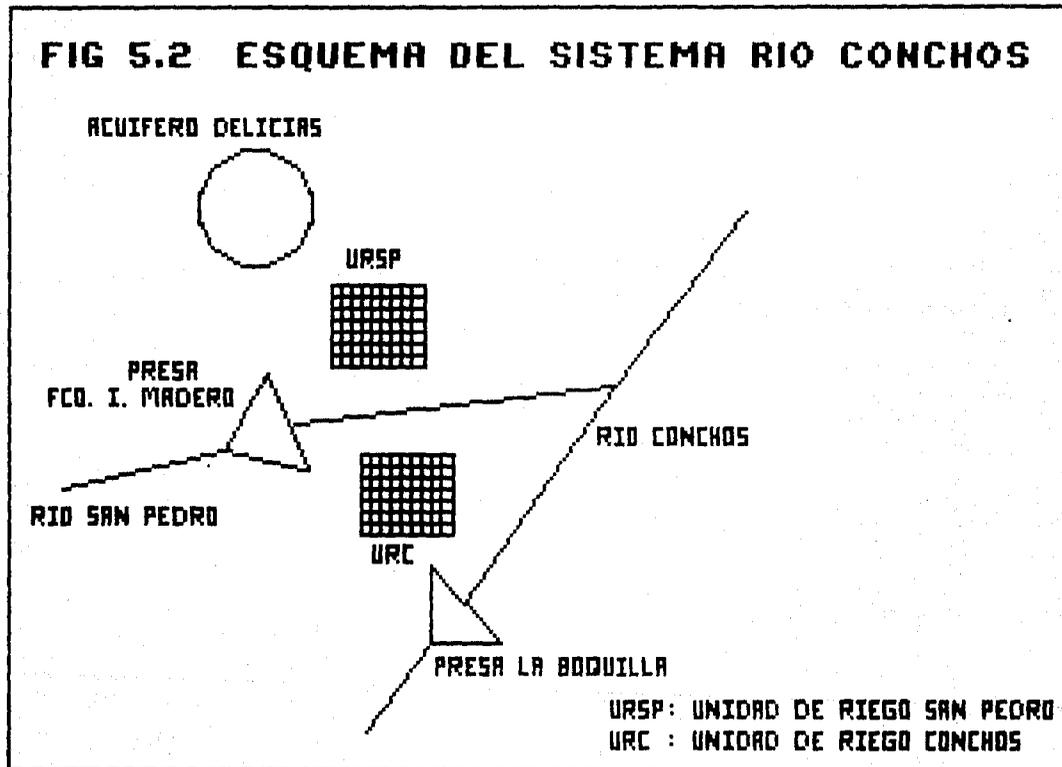
ESTADO		EXTRACCION		BENEFICIO ESPERADO UNID. MONET.
Mm3		Mm3		
PRESA 1	PRESA 2	PRESA 1	PRESA 2	
.00	.00	1020.00	340.00	-28.46
.00	340.00	1020.00	340.00	-28.46
.00	680.00	1020.00	340.00	-28.46
.00	1020.00	1020.00	680.00	-5.12
.00	1360.00	1020.00	1020.00	18.21
.00	1700.00	1020.00	680.00	-5.12
.00	2040.00	1020.00	1020.00	18.21
.00	2380.00	1020.00	1020.00	18.21
340.00	.00	1360.00	.00	-28.46
340.00	340.00	1360.00	.00	-28.46
340.00	680.00	1360.00	340.00	-5.12
340.00	1020.00	1360.00	680.00	18.21
340.00	1360.00	1360.00	340.00	-5.12
340.00	1700.00	1360.00	680.00	18.21
340.00	2040.00	1360.00	680.00	18.21
340.00	2380.00	1360.00	340.00	-5.12
680.00	.00	1360.00	.00	-12.94
680.00	340.00	1360.00	.00	-12.94
680.00	680.00	1360.00	680.00	33.72
680.00	1020.00	1360.00	680.00	33.72
680.00	1360.00	1360.00	680.00	33.72
680.00	1700.00	1360.00	680.00	33.72
680.00	2040.00	1360.00	680.00	33.72
680.00	2380.00	1360.00	680.00	33.72
1020.00	.00	1360.00	340.00	16.67

1020.00	340.00	1360.00	340.00	16.67
1020.00	680.00	1360.00	340.00	16.67
1020.00	1020.00	1360.00	340.00	16.67
1020.00	1360.00	1360.00	680.00	40.00
1020.00	1700.00	1360.00	680.00	40.00
1020.00	2040.00	1360.00	680.00	40.00
1020.00	2380.00	1360.00	680.00	40.00
1360.00	.00	1360.00	340.00	16.67
1360.00	340.00	1360.00	340.00	16.67
1360.00	680.00	1360.00	340.00	16.67
1360.00	1020.00	1360.00	680.00	40.00
1360.00	1360.00	1360.00	680.00	40.00
1360.00	1700.00	1360.00	680.00	40.00
1360.00	2040.00	1360.00	680.00	40.00
1360.00	2380.00	1360.00	680.00	40.00
1700.00	.00	1360.00	340.00	16.67
1700.00	340.00	1360.00	340.00	16.67
1700.00	680.00	1360.00	680.00	40.00
1700.00	1020.00	1360.00	680.00	40.00
1700.00	1360.00	1360.00	680.00	40.00
1700.00	1700.00	1360.00	680.00	40.00
1700.00	2040.00	1360.00	680.00	40.00
1700.00	2380.00	1360.00	680.00	40.00
2040.00	.00	1360.00	340.00	16.67
2040.00	340.00	1360.00	680.00	40.00
2040.00	680.00	1360.00	680.00	40.00
2040.00	1020.00	1360.00	680.00	40.00
2040.00	1360.00	1360.00	680.00	40.00
2040.00	1700.00	1360.00	680.00	40.00
2040.00	2040.00	1360.00	680.00	40.00
2040.00	2380.00	1360.00	680.00	40.00
2380.00	.00	1360.00	340.00	16.67
2380.00	340.00	1360.00	680.00	40.00
2380.00	680.00	1360.00	680.00	40.00
2380.00	1020.00	1360.00	680.00	40.00
2380.00	1360.00	1360.00	680.00	40.00
2380.00	1700.00	1360.00	680.00	40.00
2380.00	2040.00	1360.00	680.00	40.00
2380.00	2380.00	1360.00	680.00	40.00
2720.00	.00	1360.00	340.00	16.67
2720.00	340.00	1360.00	680.00	40.00
2720.00	680.00	1360.00	680.00	40.00
2720.00	1020.00	1360.00	680.00	40.00
2720.00	1360.00	1360.00	680.00	40.00
2720.00	1700.00	1360.00	680.00	40.00
2720.00	2040.00	1360.00	680.00	40.00
2720.00	2380.00	1360.00	680.00	40.00

POLITICA DE OPERACION OPTIMA ETAPA 2

ESTADO		EXTRACCION		BENEFICIO ESPERADO UNID. MONET.
Mm3		Mm3		
PRESA 1	PRESA 2	PRESA 1	PRESA 2	
.00	.00	1360.00	.00	-11.70
.00	340.00	1360.00	340.00	11.63
.00	680.00	1360.00	680.00	34.96
.00	1020.00	1360.00	340.00	11.63
.00	1360.00	1360.00	680.00	34.96
.00	1700.00	1360.00	680.00	34.96
.00	2040.00	1360.00	340.00	11.63
.00	2380.00	1360.00	680.00	34.96
340.00	.00	1360.00	.00	-8.06
340.00	340.00	1360.00	680.00	38.61
340.00	680.00	1360.00	680.00	38.61
340.00	1020.00	1360.00	680.00	38.61
340.00	1360.00	1360.00	680.00	38.61
340.00	1700.00	1360.00	680.00	38.61
340.00	2040.00	1360.00	680.00	38.61
340.00	2380.00	1360.00	680.00	38.61
680.00	.00	1360.00	340.00	16.50
680.00	340.00	1360.00	.00	-6.83
680.00	680.00	1360.00	340.00	16.50
680.00	1020.00	1360.00	680.00	39.83
680.00	1360.00	1360.00	680.00	39.83
680.00	1700.00	1360.00	680.00	39.83
680.00	2040.00	1360.00	680.00	39.83
680.00	2380.00	1360.00	680.00	39.83
1020.00	.00	1360.00	340.00	16.67
1020.00	340.00	1360.00	680.00	40.00
1020.00	680.00	1360.00	680.00	40.00
1020.00	1020.00	1360.00	680.00	40.00
1020.00	1360.00	1360.00	680.00	40.00
1020.00	1700.00	1360.00	680.00	40.00
1020.00	2040.00	1360.00	680.00	40.00
1020.00	2380.00	1360.00	680.00	40.00
1360.00	.00	1360.00	340.00	16.67
1360.00	340.00	1360.00	680.00	40.00
1360.00	680.00	1360.00	680.00	40.00
1360.00	1020.00	1360.00	680.00	40.00
1360.00	1360.00	1360.00	680.00	40.00
1360.00	1700.00	1360.00	680.00	40.00
1360.00	2040.00	1360.00	680.00	40.00
1360.00	2380.00	1360.00	680.00	40.00
1700.00	.00	1360.00	680.00	36.79
1700.00	340.00	1360.00	680.00	39.82
1700.00	680.00	1360.00	680.00	39.82
1700.00	1020.00	1360.00	680.00	39.82
1700.00	1360.00	1360.00	680.00	39.82
1700.00	1700.00	1360.00	680.00	39.82
1700.00	2040.00	1360.00	680.00	39.82
1700.00	2380.00	1360.00	680.00	39.82

2040.00	.00	1360.00	680.00	36.53
2040.00	340.00	1360.00	680.00	39.43
2040.00	680.00	1360.00	680.00	39.43
2040.00	1020.00	1360.00	680.00	39.43
2040.00	1360.00	1360.00	680.00	39.43
2040.00	1700.00	1360.00	680.00	39.43
2040.00	2040.00	1360.00	680.00	39.43
2040.00	2380.00	1360.00	680.00	39.43
2380.00	.00	1360.00	680.00	35.80
2380.00	340.00	1360.00	680.00	38.90
2380.00	680.00	1360.00	680.00	38.90
2380.00	1020.00	1360.00	680.00	38.90
2380.00	1360.00	1360.00	680.00	38.90
2380.00	1700.00	1360.00	680.00	38.90
2380.00	2040.00	1360.00	680.00	38.90
2380.00	2380.00	1360.00	680.00	38.90
2720.00	.00	1360.00	680.00	35.27
2720.00	340.00	1360.00	680.00	38.16
2720.00	680.00	1360.00	680.00	38.16
2720.00	1020.00	1360.00	680.00	38.16
2720.00	1360.00	1360.00	680.00	38.16
2720.00	1700.00	1360.00	680.00	38.16
2720.00	2040.00	1360.00	680.00	38.16
2720.00	2380.00	1360.00	680.00	38.16



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Entre las conclusiones que pueden ser mencionadas con respecto al desarrollo de este trabajo se encuentran:

. El esquema de la programación dinámica estocástica es una técnica de optimización adecuada para atacar el problema de optimización que plantea el manejo de presas, y en general de almacenamientos de agua en grandes proporciones que están sujetos a condiciones determinísticas y aleatorias.

. Con base en las restricciones de tipo computacional, el problema de operación de dos presas de almacenamiento es abordable; sin embargo la metodología puede consumir tiempo de cómputo excesivo para tres o más

presas, ya que el número de alternativas de análisis crece en forma cúbica.

. La función objetivo del modelo de optimización permite considerar todos los beneficios y costos de las variantes que intervienen en el problema, motivo por el cual puede estar muy apegada a la realidad.

Las recomendaciones que pueden darse con respecto a la aplicación de la metodología son las siguientes:

. La selección del módulo de discretización es muy importante, en términos generales se recomienda subdividir la capacidad útil de la presa en cuando menos 10 estados de almacenamiento, tratando de que la función de densidad de probabilidad discreta cuente con dos o tres barras de entradas.

. En la exposición del método se desprecia la autocorrelación que existe entre los ingresos a las presas, en etapas consecutivas, esto no en todos los casos es cierto, sobre todo en intervalos de tiempo pequeños (días o semanas). Se aconseja valuar esta correlaciones y en caso necesario, utilizar las funciones de densidad de probabilidad condicional. Esta acción, aunque más apegada a la realidad, tiene la desventaja de incrementar fuertemente el volumen de cálculos necesarios.

. Es posible considerar la metodología expuesta para el caso de un sistema de presas en cascada; en esa situación, se hace necesario considerar en la función de densidad de probabilidad de escurrimientos de la presa ubicada aguas abajo, las condiciones que imponen las posibles descargas de la obra de toma y del vertedor de la presa ubicada aguas arriba.

. La política de operación tiene para el ingeniero la insensibilidad de los números, además de que al ser determinada se hacen simplificaciones que en muchos casos alejan al modelo de la realidad. Para conocer las posibles consecuencias de esta, es necesario hacer uso de las técnicas de simulación, metodología con la cual podrán conocerse parámetros importantes asociados, como son, por ejemplo, el nivel deficitario, el comportamiento de las variables como volumen de evaporación, el número de veces que derraman las presas, los niveles de almacenamiento promedio alcanzados, etc. En términos generales, las políticas pueden ser ajustadas o afinadas mediante la simulación del sistema.

. Es necesario continuar con la búsqueda de nuevos esquemas de solución de tipo teórico y computacional, que ayuden a resolver el problema de manera eficiente, particularmente es posible mejorar los tiempos de cómputo mediante una programación adecuada de la metodología, que evite cálculos repetitivos.

7. REFERENCIAS

1. Rosso, F.O., "Método de los sistemas", Publicación D-56, DEPFI, UNAM, 1985.
2. Underhill, D.P., "Los métodos de simulación en el aprovechamiento de los recursos hídricos", Serie Estudios sobre riego y avenamiento, Publicación 23, ONU, 1974.
3. Bazarra, M.S., "Linear Programming and Network flows", John Wiley and Sons, 1978.
4. Domínguez, M.R., "Metodología de selección de una política de operación conjunta de una presa y su vertedor", Tesis Doctoral, DEPFI, UNAM, México 1989.
5. Joeres, E.F., "The use of chance - constraints in reservoir desing and management ..
6. Prawda, W.J., "Métodos y modelos de investigación de operaciones, Vol I ..", LIMUSA, México 1976.
7. González, V.F., y Capella, V.A., "Modelos para análisis de redes de abastecimiento de agua potable", Instituto de ingeniería, UNAM, Publicación N° 286, México 1971.

8. Gutiérrez, M.A., "Curso: Modelos de asignación de agua, módulo I", IMTA, México 1986.

9. González, V.F., "El método de Howard aplicado a un problema de asignación de agua", SARH, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, México 1979.

10. Larios, M.R., "Modelo de programación dinámica estocástica para optimizar la operación de presas", Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México 1985.

11. Díaz, V.J., "Procesos Markovianos discretos aplicados a sistemas de recursos hidráulicos", Tesis de maestría, DEPEFI, UNAM, México 1980.

12. Cruickshank, V.C., "Geohidrología", Manual de Diseño de Obras Civiles, Capítulo A.1.12, Comisión Federal de Electricidad, México 1983.

13. Custodio Y Llamas, "Hidrología Subterránea", Editorial Omega, España 1965.

14. Niedzielski, H., "Apuntes de Geohidrología", Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México 1965.

15. Fuentes M.S., "Políticas de operación de presas", Revista de

Ingeniería Hidráulica en México, SARH, 1987.

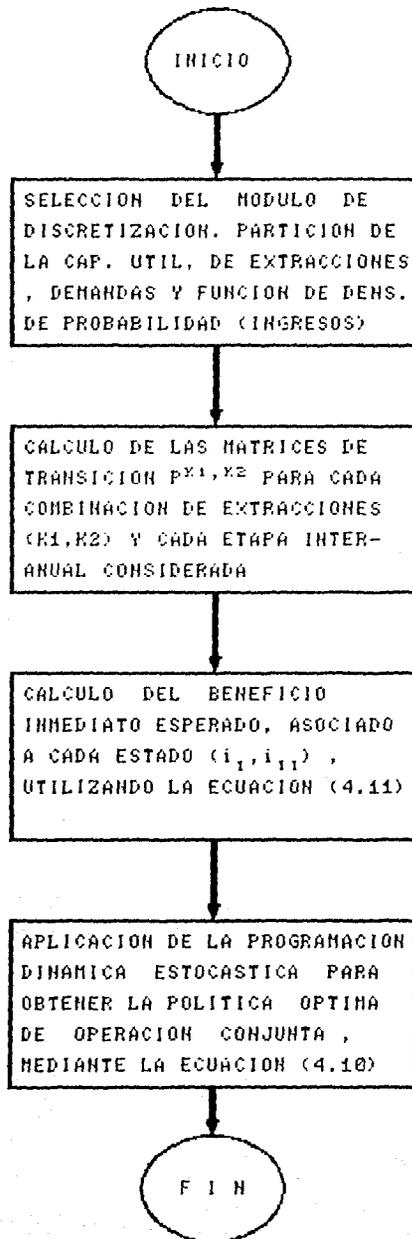
16. Domínguez, M.R. , "Operación conjunta del sistema de presas Infiernillo-La Villita en la cuenca del río Balsas", Informe interno, Instituto de ingeniería, México 1984.

17. Domínguez, M.R. , "Políticas de operación del sistema de presas del río Grijalva", Informe interno, Instituto de ingeniería, UNAM, México 1988.

18. Howard, R. , "Dynamic Programming and Markov Processes", M.I.T., PRESS, 1966.

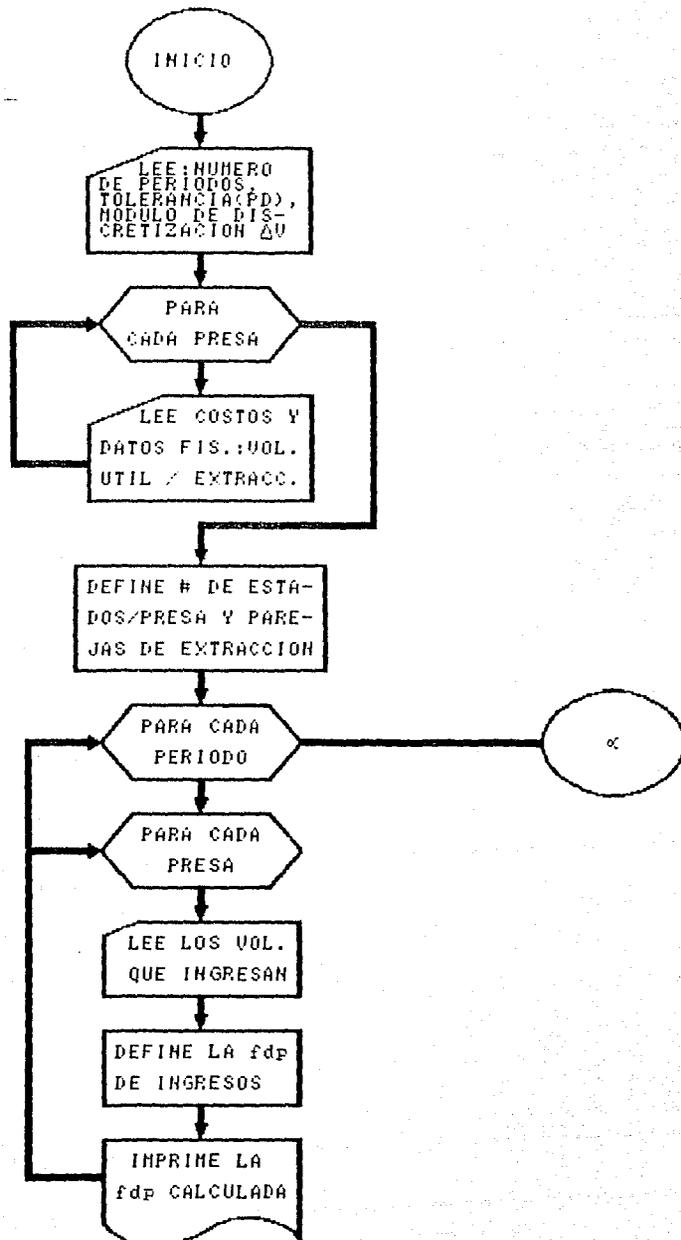
8. ANEXOS

8.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL METODO

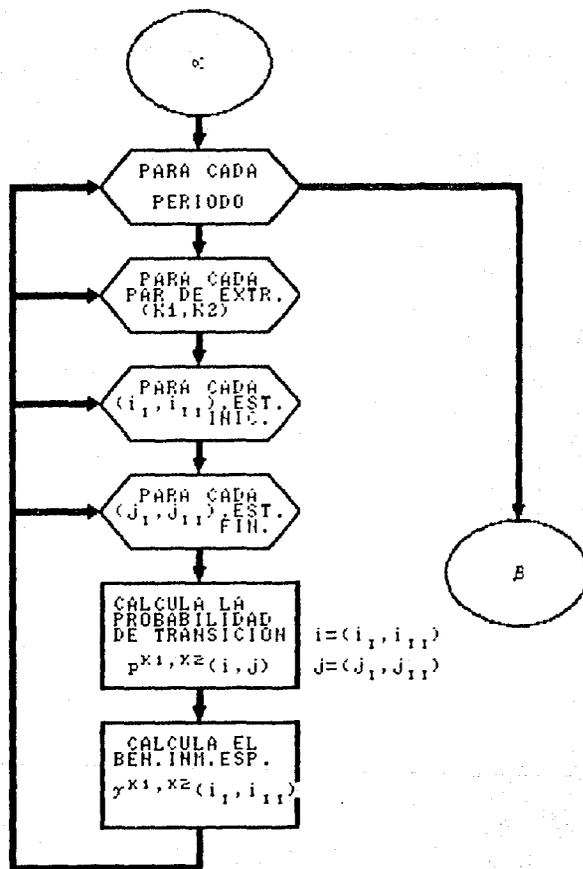


8.2 PROGRAMA OPTIMII

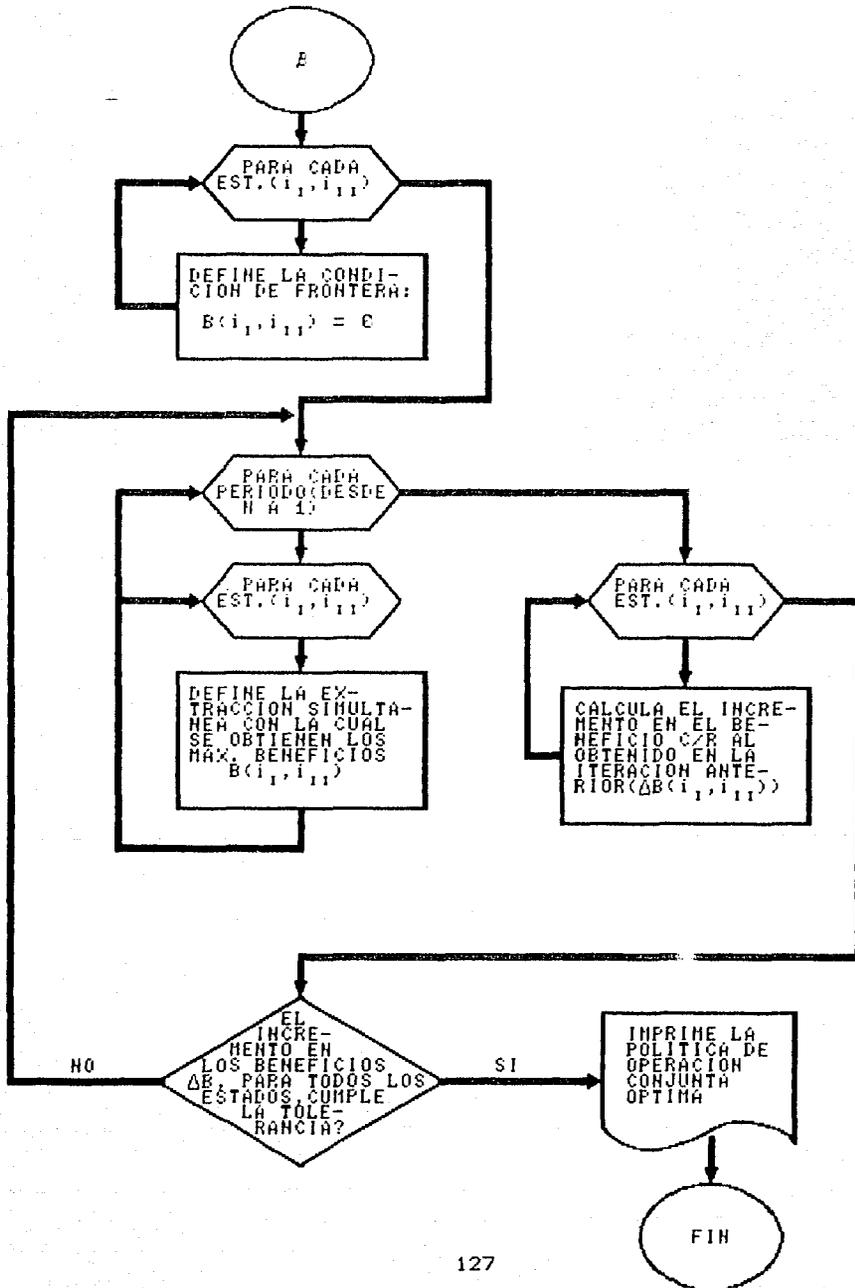
8.2.1 DIAGRAMA DE BLOQUES



DETERMINA LAS MATRICES DE TRANSICION
Y BENEFICIOS



APLICA EL ESQUEMA DE LA PROGRAMACION DINAMICA ESTOCASTICA



8.2.2 PROGRAMA PRINCIPAL Y SUBRUTINAS

El programa OPTIMII consta de un programa principal y siete subrutinas; está escrito en lenguaje FORTRAN77 adaptado a computadoras PC o compatibles. Las funciones de cada componente del programa son descritas a continuación:

PROGRAMA PRINCIPAL

Este coordina la operación de todas las funciones del programa; imprime las funciones de densidad de probabilidad empírica proporcionadas u obtenidas para cada presa y cada etapa; llama a las subrutinas LECTU, PROB, MATRIZ y PROGDI.

SUBROUTINA LECTU

Lee los datos generales de entrada correspondientes a capacidades de las presas, costos por déficit, derrames en cada una y conducción; lee las funciones de densidad de probabilidad dicretizadas, en caso de que sean conocidas; calcula, de acuerdo al módulo de discretización seleccionado, el número de estados en cada presa; calcula la discretización de las extracciones, con base en los datos de capacidad de descarga de cada presa; escribe los datos de entrada y los de dicretización de variables.

SUBROUTINA_PROB

Calcula la función de densidad de probabilidad empírica asociada a un periodo del año; lee los datos de los volúmenes de entrada por periodo, en la presa que se desea calcular la función de densidad de probabilidad; ordena los datos de menor a mayor y asigna una probabilidad empírica, utilizando la fórmula de Weibull, esto es, para los volúmenes $V(i), i=1, \dots, na$, aplica:

$$p(X \leq x_i = v_i) = i / (m + 1)$$

donde m es un número consecutivo asignado a cada volumen de entrada una vez ordenados los datos. La probabilidad es calculada en la mitad del intervalo, considerando el ΔV asignado por el usuario desde la subrutina LECTU; llama a las subrutinas BURBUJA y WEIBULL.

SUBROUTINA_BURBUJA

Ordena los volúmenes de entrada de menor a mayor.

SUBROUTINA_WEIBULL

Calcula la probabilidad empírica del conjunto de datos proporcionados por el usuario.

SUBROUTINA MATRIZ

Calcula las matrices de transición correspondientes a cada período y cada alternativa de extracción en cada una de las presas; calcula al mismo tiempo el vector de beneficios inmediatos esperados, guardando todos los datos procesados en un archivo de acceso directo. En cuanto a las matrices de transición, aplica el procedimiento descrito en el inciso 3.5 de esta tesis, o sea, calcula el volumen q_I, q_{II} que debe llegar a las presas para pasar del estado (i_I, i_{II}) al (j_I, j_{II}) , dado que la extracción propuesta es (k^I, k^{II}) . El beneficio en cada alternativa de extracción para todas y cada una de las transiciones, se calcula utilizando la ecuación (4.8); con los datos anteriores es posible conocer el beneficio inmediato esperado asociado a cada uno de los estados que presenta el sistema, al combinar los niveles de almacenamiento en las presas, haciendo uso de la ecuación (4.11) sucesivamente en cada estado; llama a la subrutina BENEFF; imprime si es el caso, las matrices de transición y beneficios.

SUBROUTINA BENEFF

Calcula el beneficio por entregar un volumen de agua $k^I + k^{II}$, a la zona de demanda. utiliza la expresión:

$$G = kon + \frac{vet}{demanda} * (100 - kon)$$

kon es una constante que debe ser seleccionada por el usuario, en el

procedimiento de ajuste de la política; vet corresponde al volumen total entregado por el sistema k^I+k^{II} , y la variable demanda es el volumen requerido por la zona. Cabe mencionar que esta subrutina puede ser modificada por el usuario, de acuerdo con las necesidades de cada estructura económica particular, asociada a un problema.

SUBROUTINA PROGDIN

Aplica la programación dinámica estocástica al sistema de presas de acuerdo con la ecuación (4.10), utilizando las matrices guardadas en el archivo de acceso directo, creado en la subrutina MATRIZ; realiza las iteraciones, hasta que los incrementos del beneficio entre cada estado discretizado del sistema de presas sean similares, de acuerdo con la tolerancia asignada por el usuario en la variable "tol" de la subrutina LECTU; imprime la política de operación conjunta óptima.

8.2.3 ENTRADA DE DATOS Y SALIDA DE RESULTADOS

El programa OPTIMII utiliza un archivo de lectura de datos que puede ser creado en cualquier editor disponible; este debe estar compuesto de los siguientes registros (ordenados):

REGISTRO TIPO 1: tit

FORMATO: A79

tit título asignado al trabajo

REGISTRO TIPO 2: ne,tol,kon,impres,dv

FORMATO: LIBRE

ne número de etapas en que se divide el año

tol tolerancia en el método de la programación dinámica

kon constante de la función de beneficios

impres índice de impresión de las matrices de transición y
beneficios (=0 no se imprimen ; =1 se imprimen)

No se aconseja imprimir las matrices cuando se discretizan las presas en más de 5 estados de almacenamiento, ya que la capacidad de las impresoras es insuficiente para imprimir completa una matriz demasiado grande.

dv módulo de discretización de estados, extracciones y entradas a las presas (Mm^3)

Los registros tipos continen información relativa a las presas 1 y 2, respectivamente.

REGISTRO TIPOS 3 Y 4: $\text{indi}(i), \text{smin}(i), \text{cu}(i), \text{cond}(i)$ FORMATO: LIBRE

$\text{indi}(i)$ indica si se calcula o no la función(s) de densidad de probabilidad en la presa i ($=0$ se calcula ; $=1$ no se calcula y se darán sus datos en la variable correspondiente)

$\text{smin}(i)$ volumen mínimo en la presa i (capacidad de azolves) (Mm^3)

$\text{cu}(i)$ volumen útil de almacenamiento en la presa i (Mm^3)

$\text{cond}(i)$ costo de conducir un volumen dv de agua, desde la presa i hasta la zona de demanda (en unidades monetarias congruentes con las penalizaciones por déficit y derrame)

Los registros tipo 5 y 6 se repiten por parejas para cada presa y cada período del año considerado. Estos se reportan solo en caso de que la variable $\text{indi}(i)$ de la presa i , sea igual a 1. Se reportan primero los datos de cada período en la presa 1 y posteriormente los de la 2.

REGISTRO TIPO 5: $\text{nx}(i,1)$ FORMATO: LIBRE

$\text{nx}(i,1)$ número de ordenadas de la función de densidad de probabilidad discretizada, correspondiente a la presa i , en la etapa 1

REGISTRO TIPO 6: $(e(i,1,j), j=1, \text{nx}(i,1))$ FORMATO: LIBRE

$e(i,1,j)$ probabilidad de ingreso del volumen j (discretizado) a la presa i , durante el período 1

Deben existir tantos registros del tipo 7 como etapas consideradas en el año; este corresponde a los datos relativos a la zona de demanda.

REGISTRO TIPO 7: cdef(1), demanda(1)

FORMATO: LIBRE

cdef(1) coeficiente de penalización por el déficit derivado de prometer y no entregar un volumen dv a la zona de demanda, durante la etapa 1 (en unidades monetarias congruentes con el esquema económico utilizado)

demanda(1) volumen demandado al sistema de presas en la etapa 1. Este valor también debe ser proporcionado en forma discreta, con base en el dv utilizado

El registro tipo 8 se repite para cada presa, desde la 1, tantas veces como etapas o períodos se consideren en el año.

REGISTRO TIPO 8: cderr(i,1),desc(i,1)

FORMATO: LIBRE

cderr(i,1) coeficiente de penalización unitario por cada dv derramado por el vertedor de la presa i , en la etapa 1

desc(i,1) capacidad máxima de descarga discretizada, para la presa i , en el período o etapa 1

Con respecto a la salida de resultados del programa, esta se conforma de los datos de entrada por presa y período; las matrices de transición son opcionales de imprimir, de acuerdo a la variable

impresión. La política de operación conjunta óptima del sistema de presas, se imprime para cada estado de discretización considerado en las presas.

8.2.4 LIMITACIONES Y/O RESTRICCIONES DEL PROGRAMA

Las limitaciones que pueden ser mencionadas con respecto a un programa de cómputo pueden ser de tipo externo o interno.

En cuanto a las limitaciones de tipo externo, la principal de ellas se refiere a la capacidad de memoria del equipo de trabajo. A este respecto el programa OPTIMII no tiene problemas, ya que los arreglos de las matrices de transición y de beneficios, los cuales ocuparían la mayor cantidad de memoria RAM, son guardadas en un archivo de acceso directo el cual es posteriormente utilizado en la fase de programación dinámica. Con este hecho, se ahorra en memoria ocupada pero se sacrifica en tiempo debido a la lectura repetitiva que es necesario realizar sobre el archivo creado.

Las limitaciones internas se refieren a las dimensiones de los arreglos utilizados por el programa. En este caso, la versión que se presenta del programa OPTIMII, está diseñada para considerar discretizaciones de hasta 10 estados de la capacidad útil relativa a

cada una de las presas que integran el sistema e igual número de posibles extracciones en cada una. El número máximo en que puede ser subdividido el año (etapas) es de 12.

Cabe mencionar que es posible mejorar la estructura del programa, si en las matrices de transición que se guardan temporalmente en el archivo de acceso directo, solo se consideran las probabilidades distintas de cero.

8.2.5 LISTADO DEL PROGRAMA FUENTE


```

CALL BORRA(10)
CALL ATRIBUTOS(0,0,1)
CALL POSICION(11,24)
WRITE(*,10) ' Nombre del archivo de impresion ?'
CALL POSICION(12,35)
READ(*,10) nomsa1
CALL BORRA(10)
CALL ATRIBUTOS(0,1,1)
CALL POSICION(11,15)
WRITE(*,'(A33,A12)') 'LEYENDO INFORMACION DEL ARCHIVO: ',noment
imp=4
C
C ARCHIVO DE SALIDA DE RESULTADOS
C
C OFEN(imp,FILE=nomsa1,STATUS='NEW')
C
C LLAMA A LA SUBROUTINA LECTU PARA LEER DATOS DE ENTRADA
C
C CALL LECTU(lec)
C
C CALL BORRA(10)
C CALL ATRIBUTOS(0,1,1)
C CALL POSICION(11,25)
C WRITE(*,'(A22)') 'PROCESANDO INFORMACION'
C
C EN CASO DE SER NECESARIO CALCULA LA FUNCION DE DENSIDAD DE
C PROBABILIDAD EMPIRICA. UTILIZANDO EL REGISTRO HISTORICO DE
C ESCURRIMIENTOS. IMPRIME LA FUNCION DE DENSIDAD DE CADA ETAPA
C INTERANUAL (O ANUAL) CONSIDERADA. EL CALCULO SE REALIZA EN
C INTERVALOS, PARA VOLUMENES IGUALES A dv,2*dv,3*dv,...; RESUL-
C TANDO FINALMENTE LA PROBABILIDAD EN EL PUNTO MEDIO DE CADA
C INTERVALO DE LA PARTICION
C
C DO 14 i=1,2
C IF(indi(i).EQ.0)THEN
C   DO 12 l=1,ne
12 CALL PROB(lec,imp,i,l)
C END IF
14 CONTINUE
C
C IMPRIME LA FUNCION DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE CADA PRESA
C
C DO 18 i=1,2
C WRITE(imp,6) i
C   DO 15 l=1,ne
C WRITE(imp,4) l
C   nxe=nx(i,l)
15 WRITE(imp,3) (e(i,l,ii),ii=1,nxe)
18 CONTINUE
3 FORMAT(10F10.5)
4 FORMAT(//,'PERIODO: ',I3,/)
6 FORMAT(///,5X,'FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD EN LA PRESA:
&',I3,/)
C
C CLOSE(lec)
C
C CALCULA MATRICES DE TRANSICION Y DE BENEFICIOS INMEDIATOS
C ESPERADOS PARA CADA COMBINACION DE EXTRACCIONES Y LAS IMPRIME

```

```

C
C CALL MATRIZ(imp)
C
C APLICA EL METODO DE LA PROGRAMACION DINAMICA ESTOCASTICA
C PARA ENCONTRAR LA POLITICA OPTIMA E IMPRIME RESULTADOS
C LLAMA A LA SUBROUTINA DE BENEFICIOS BENE
C
C CALL PROGDI(imp)
C CLOSE(17mp)
C STOP
C END
C
C SUBROUTINA LECTU: SE LEEN LOS DATOS NECESARIOS
C
C SUBROUTINE LECTU(lec)
COMMON/UNO/na,dv,smin(2),ns(2),nk(2,12),ne,indi(2)
COMMON/DOS/cderr(2,12),cdef(12),cond(2)
COMMON/TRES/e(2,12,20),nx(2,12)
COMMON/CINCO/tol
COMMON/SEIS/kon,demanda(12)
COMMON/SIETE/niv(20),ksal(20),impres
DIMENSION desc(2,20),cu(2)
CHARACTER tit*79
imp=4
C
C DATOS REQUERIDOS :
C
C tit : titulo asignado al trabajo
C ne : numero de etapas en que divide el año
C indi(i) : indica si se calcula o no la funcion de densidad
C de probabilidad.
C =0 se calcula, =1 no se calcula y se dan sus datos
C impres : indice de impresion de las matrices de transicion y
C beneficios
C =0 no se imprimen, =1 se imprimen
C nx(i,1) : numero de ordenadas de la funcion de densidad de
C probabilidad correspondiente a la presa i en la etapa 1
C ns(i) : numero de estados en los que se divide la capacidad util
C del vaso i
C dv : delta de volumen propuesta para los vasos (Mm3)
C smin(i) : almacenamiento minimo permitido en el vaso i (Mm3)
C cu(i) : capacidad util del vaso i (Mm3)
C cdef(i) : coeficiente o penalizacion por cada dv de agua
C prometido y no entregado en la etapa i (deficit)
C cderr(i,1): coeficiente o penalizacion por cada dv de agua
C derramado por la obra de excedencias en la presa i y
C la etapa 1 (exceso)
C desc(l,i) : volumen maximo que se puede turbinar o extraer por la
C obra de toma en la presa i y etapa 1 (Mm3)
C tol : tolerancia permitida para terminar las iteraciones en
C el metodo de la programacion dinamica . Se recomienda 0.01
C kon : coeficiente de la funcion de beneficios
C demanda(1) : volumen de demanda en la etapa interanual 1 (Mm3)
C cond(i) : costo de conducir un dv de agua desde la presa i hasta
C la zona de demanda (en unidades monetarias congruentes
C con las penalizaciones por deficit y derrame)
C
C READ(lec,'(A79)')tit

```

```

READ(lec,*)ne,tol,kon,impres,dv
C
DO 2 i=1,2
2 READ(lec,*)indi(i),smin(i),cu(i),cond(i)
C
SI ES NECESARIO SE LEEN LAS FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD
POR PRESA Y ETAPA
C
DO 8 i=1,2
IF(indi(i).EQ.1)THEN
DO 4 l=1,ne
READ(lec,*)nx(i,l)
4 READ(lec,*)(e(i,l,j),j=1,nx(i,l))
END IF
8 CONTINUE
C
DO 6 l=1,ne
6 READ(lec,*)cdef(l),demanda(l)
C
DO 12 i=1,2
DO 12 l=1,ne
12 READ(lec,*)cderr(i,l),desc(i,l)
C
SE CALCULA LA UNIDAD DE DISCRETIZACION DE ESTADOS EN LOS VASOS (dv)
Y EL NUMERO POSIBLE DE EXTRACCIONES EN CADA ETAPA 1 CONSIDERADA (nk(i))
C
DO 13 i=1,2
13 ns(i)=cu(i)/dv
DO 14 i=1,2
DO 14 l=1,ne
14 nk(i,l)=desc(i,l)/dv
C
ESCRIBE DATOS DE ENTRADA
C
WRITE(imp,10)tit
10 FORMAT(14X,A79,/)
WRITE(imp,24)ne,kon
24 FORMAT(/,10X,'NUMERO DE PERIODOS INTERANUALES: ',I5,/,10X,'COEFICI
&ENTE DE LA FUNCION DE BENEFICIOS: ',I5,/)
C
DO 30 i=1,2
WRITE(imp,28)i
28 FORMAT(/,10X,' PRESA: ',I3,/)
WRITE(imp,16)cu(i),smin(i),dv,ns(i),cond(i)
16 FORMAT(10X,'DATOS DE LA CORRIDA: ',/,10X,'CAPACIDAD UTIL (Mm3): ',
&F8.2,/,10X,'CAPACIDAD DE AZOLVES (Mm3): ',F8.2,/,10X,'INCREMENTO D
&E VOLUMEN (Mm3): ',F8.2,/,10X,'PARTICION DE LA CAPACIDAD UTIL: ',
&I5,/,10X,'COSTO UNITARIO DE CONDUCCION: ',F7.1,/)
WRITE(imp,18)
18 FORMAT(5X,'DATOS POR PERIODO: ',/,5X,'PERIODO',7X,'COEFICIENTES',
&13X,'DEMANDA',/,15X,'DEFICIT',5X,'DERRAME',7X,'(* dv Mm3)',/)
DO 20 l=1,ne
20 WRITE(imp,22)l,cdef(l),cderr(i,l),demanda(l)
22 FORMAT(4X,I5,5X,F7.1,5X,F7.1,9X,F7.1)
30 CONTINUE
C
SE GENERAN LAS MATRICES DE ESTADOS Y DE EXTRACCIONES
(SE CONSIDERAN LAS ALTERNATIVAS CERO)

```

```

C
C      j=0
C      DO 25 i=1,20
C          niv(i)=j
C          ksal(i)=j
25      j=j+1
C
C      RETURN
C      END
C
C      SUBROUTINA DE CALCULO DE LA FUNCION DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD
C      EMPIRICA UTILIZANDO LA FORMULA DE WEIBULL
C
C      SUBROUTINE PROB(lec,imp,j,l)
C      COMMON/UNO/na,dv,smin(2),ns(2),nk(2,12),ne,indi(2)
C      COMMON/TRES/e(2,12,20),nx(2,12)
C      DIMENSION v(70),pq(70)
C
C      READ(1ec,*)na
C      READ(1ec,*)(v(i),i=1,na)
C      CALL BURBUJA(v,na)
C      DO 50 i=1,na
50      pq(i)=0.0
C      CALL WEIBULL(pq,na)
C      WRITE(imp,3)
C      WRITE(imp,6) (pq(i),i=1,na)
C      WRITE(imp,4)
C      WRITE(imp,9) (v(i),i=1,na)
C
C      na      NUMERO DE DATOS O AÑOS CONSIDERADOS
C      v(i)    VOLUMEN ESCURRIDO EN EL AÑO O ETAPA INTERANUAL i
C      pq(i)   PROBABILIDAD DE PRESENTARSE UN VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO
C              MENOR O IGUAL A i. FUNCION DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD
C              EMPIRICA
C
C      nx(j,1)=v(na)/dv+0.5
C
C      EN BASE A LOS DATOS CALCULA LAS PROBABILIDADES EN LOS PUNTOS
C      MEDIOS DE LOS INTERVALOS dv,2*dv,.....,N*dv=v(na)/dv.
C      LOS VALORES DE DICHAS PROBABILIDADES SON ALMACENADOS EN LA MATRIZ
C      e(1,iq),iq=1,iq+1
C
C      q=dv/2.
C      nx1=nx(j,1) + 1
C      n=1
C
C      DO 10 iq=1,nx1
C      q=q+dv
C      IF(q.LE.v(1)) GOTO 11
C      IF(q.GE.v(na)) GOTO 12
C
C      DO 20 jj=n,na
C      IF(v(jj).LE.q.AND.v(jj+1).GT.q) GOTO 21
C      GOTO 20
21      n=jj
C      e(j,1,iq)=pq(jj)+((pq(jj+1)-pq(jj))*(q-v(jj))/(v(jj+1)-v(jj)))
C      GOTO 10
20      CONTINUE

```

```

11 e(j,1,1q)=qnpa(1)/v(1)
   GOTO 10
12 m=ne
   e(j,1,1q)=1.
10 CONTINUE
C
   nxe=nx(j,1)
   IF (nx1.EQ.1) GOTO 30
   nxe=nx(j,1)
   DO 30 1q=2,nxe
   e(j,1,1q)=e(j,1,1q)-e(j,1,1q-1)
30 CONTINUE
   px=0.
   DO 31 1q=1,nxe
   px=px+e(j,1,1q)
31 CONTINUE
   IF (px.EQ.1.) GOTO 33
   DO 32 1q=1,nxe
32 e(j,1,1q)=e(j,1,1q)/px
33 CONTINUE
C
C           ***** FORMATOS *****
C
1   FORMAT(I5)
2   FORMAT(16F5.0)
3   FORMAT(/,5X,'  PROBABILIDADES  ',/)
4   FORMAT(/,5X,' VOL/ESCURRIMIENTOS  ',/)
6   FORMAT(1X,10F10.3)
7   FORMAT(1X,16F6.1)
9   FORMAT(1X,10F10.1)
100 CONTINUE
   RETURN
   END
C
C   SE ORDENAN VOLUMENES DE ENTRADA DE MENOR A MAYOR
C
SUBROUTINE BURBUJA (v,n)
DIMENSION v(70)
k=n-1
DO 10 i=1,k
l=i+1
DO 15 j=1,n
IF (v(i) .LE. v(j)) GOTO 15
t=v(i)
v(i)=v(j)
v(j)=t
15 CONTINUE
10 CONTINUE
RETURN
END
C
C   SE CALCULAN PROBABILIDADES EMPIRICAS DE VOLUMENES DE ESCURRIMIENTO
C
SUBROUTINE WEIBULL (pq,n)
DIMENSION pq(70)
r=n+1
DO 20 i=1,n
pq(i)= i/r

```

```

20 CONTINUE
RETURN
END

C
C SUBROUTINA MATRIZ: CALCULA LAS MATRICES DE TRANSICION Y DE
C BENEFICIOS INMEDIATOS ESPERADOS PARA CADA
C EXTRACCION POSIBLE
C
SUBROUTINE MATRIZ(imp)
COMMON/UNO/na,dv,emin(2),ns(2),nk(2,12),ne,indi(2)
COMMON/DOS/cderr(2,12),cdef(12),cond(2)
COMMON/TRES/e(2,12,20),ns(2,12)
COMMON/SIETE/niv(20),ksal(20),impres
COMMON/OCHO/ik(12,18,18),ie(18,18),jk(12),ji,niw(12)
INTEGER x(2)
DIMENSION ia(2),ic(2),nmax(2),inter(2),p(200,200),be(200)

C
C ENTRADA MINIMA : VOLUMEN MENOR O IGUAL A 1 DELTA V
C
emin=1

C
C CREA LA MATRIZ DE INDICES DE EXTRACCION Y DE NIVELES EN LAS PRESAS
C
DO 15 l=1,ne
iw=1
DO 15 k1=1,nk(1,1)+1
DO 15 k2=1,nk(2,1)+1
ik(1,k1,k2)=iw
15 iw=iw+1
iw=1
DO 20 i1=1,ns(1)+1
DO 20 i2=1,ns(2)+1
ie(i1,i2)=iw
20 iw=iw+1

C
C jk: DIMENSIONES DE LA MATRIZ DE EXTRACCIONES DEL SISTEMA
C ji: DIMENSIONES DE LA MATRIZ DE ESTADOS DEL SISTEMA
C
DO 25 l=1,ne
jk(1)=(nk(1,1)+1)*(nk(2,1)+1)
ji=(ns(1)+1)*(ns(2)+1)
25 CONTINUE

C
C IF(impres.EQ.1)THEN
C WRITE(imp,35)
35 FORMAT(///,16X,'MATRICES DE TRANSICION Y BENEFICIOS: ',/)
C END IF

C
C ITERACION CONTADA SOBRE LOS PERIODOS INTERANUALES
C
iw=0
DO 130 l=1,ne
WRITE(*,*) 'PROCESANDO LA ETAPA: ',l
IF(impres.EQ.1)THEN
WRITE(imp,80)l
80 FORMAT(/,26X,'ETAPA: ',15,/)
END IF

```

```

C     ABRE ARCHIVO DE ACCESO DIRECTO EN DONDE SERAN ALMACENADOS
C     TEMPORALMENTE LOS VECTORES DE BENEFICIOS INMEDIATOS Y LAS
C     MATRICES DE TRANSICION DEL SISTEMA PARA CADA ETAPA Y CADA
C     ALTERNATIVA DE EXTRACCION CONJUNTA
C
C     IF(1.EQ.1) OPEN(100,FILE='C:TRANS.DAT',
&         FORM='FORMATTED',ACCESS='DIRECT',RECL=1813,STATUS='NEW')
C
C     ITERACION CONTADA SOBRE LAS EXTRACCIONES EN LA PRESA 1
C
C     DO 70 k1=1,nk(1,1)+1
C
C     ITERACION CONTADA SOBRE LAS EXTRACCIONES EN LA PRESA 2
C
C     DO 60 k2=1,nk(2,1)+1
C
C     INICIALIZA MATRIZ DE TRANSICION Y DE BENEFICIOS
C
C     DO 30 i=1,ji
C         be(i)=0.0
C     DO 30 j=1,ji
C         p(1,j)=0.0
30 CONTINUE
C
C     ITERACION CONTADA SOBRE LOS ESTADOS INICIALES EN LA PRESA 1
C
C     DO 40 i1=1,ns(1)+1
C
C     ITERACION CONTADA SOBRE LOS ESTADOS INICIALES EN LA PRESA 2
C
C     DO 40 i2=1,ns(2)+1
C
C     ITERACION CONTADA SOBRE LOS ESTADOS FINALES EN LA PRESA 1
C
C     DO 40 j1=1,ns(1)+1
C
C     ITERACION CONTADA SOBRE LOS ESTADOS FINALES EN LA PRESA 2
C
C     DO 40 j2=1,ns(2)+1
C
C     PARA LA ETAPA 1:
C     CALCULA LA ENTRADA NECESARIA PARA PASAR DEL ESTADO i1 AL j1
C     BAJO LA EXTRACCION k1 EN LA PRESA 1 E IGUAL LA ENTRADA NECESARIA
C     PARA PASAR DEL ESTADO i2 AL j2 BAJO LA EXTRACCION k2 EN LA PRESA 2
C
C         ia(1)=niv(j1)
C         ia(2)=niv(j2)
C         ic(1)=niv(i1)
C         ic(2)=niv(i2)
C         x(1)=ia(1)-ic(1)+ksal(k1)
C         x(2)=ia(2)-ic(2)+ksal(k2)
C     DO 38 i=1,2
C         nmax(i)=x(i)
38     inter(i)=1
C
C     DO 45 i=1,2
C         IF(x(i).GE.0)THEN
C             IF(x(i).GT.nx(i,1))THEN

```

```

        IF(ia(i).GT.0.AND.ia(i).LE.na(i))THEN
            GOTO 40
        ELSE
            x(i)=nx(1,1)
            nmax(i)=emin
            inter(i)=-1
        END IF
    ELSE
        IF(x(i).EQ.0)THEN
            IF(ia(i).EQ.na(i))THEN
                x(i)=emin
                nmax(i)=nx(i,1)
            ELSE
                GOTO 40
            END IF
        ELSE
            IF(ia(i).EQ.na(i))nmax(i)=nx(i,1)
            IF(ia(i).EQ.0)THEN
                nmax(i)=emin
                inter(i)=-1
            END IF
        END IF
    END IF
ELSE
    GOTO 40
END IF
45 CONTINUE
C
C   ITERACION SOBRE ENTRADAS A LA PRESA 1
C
    DO 50 n=x(1),nmax(1),inter(1)
C
C   ITERACION SOBRE ENTRADAS A LA PRESA 2
C
        DO 50 m=x(2),nmax(2),inter(2)
            k=ik(1,k1,k2)
            i=ie(i1,i2)
            j=ie(j1,j2)
            p(i,j)=p(i,j)+e(1,1,n)*e(2,1,m)
C
C   DEFINE EL VOLUMEN ENTREGADO POR CADA PRESA
C
            ve1=n+niv(i1)-niv(j1)
            ve2=m+niv(i2)-niv(j2)
            vet=ve1+ve2
C
C   REvisa LA POSIBILIDAD DEL DEFICIT
C
            IF(vet.LT.(ksal(k1)+ksal(k2)))THEN
                def=ksal(k1)+ksal(k2)-vet
C
C   AFECTA EL BENEFICIO DE ACUERDO CON EL VOLUMEN DEFICITARIO
C
                be(i)=be(i)-def*cdef(1)*e(1,1,n)*e(2,1,m)
            ELSE
C
C   REvisa LA POSIBILIDAD DE DERRAME DEL SISTEMA
C

```

```

      IF(vet.GT.(ksal(k1)+ksal(k2)))THEN
        IF(ve1.GT.ksal(k1))THEN
          vd=ve1-ksal(k1)
C
C      PENALIZA EL BENEFICIO DE ACUERDO AL VOLUMEN DERRAMADO EN PRESA 1
C
          be(i)=be(i)-(vd*cderr(1,1)*e(1,1,n)*e(2,1,m))
          ve1=ksal(k1)
        END IF
        IF(ve2.GT.ksal(k2))THEN
          vd=ve2-ksal(k2)
C
C      PENALIZA EL BENEFICIO DE ACUERDO AL VOLUMEN DERRAMADO EN PRESA 2
C
          be(i)=be(i)-(vd*cderr(2,1)*e(2,1,m)*e(1,1,n))
          ve2=ksal(k2)
        END IF
        vet=ve1+ve2
      END IF
    END IF
  CALL BENE(1,vet,G)
  AFECTA EL BENEFICIO CON LAS PENALIZACIONES POR CONducIR
  EL VOLUMEN EXTRAIDO DE CADA PRESA HASTA LA ZONA DE DEMANDA
  be(i)=be(i)+(G-cond(1)*ve1-cond(2)*ve2)*e(1,1,n)*e(2,1,m)
C
50 CONTINUE
40 CONTINUE
C
  ESCRIBE EL VECTOR DE BENEFICIOS Y MATRIZ DE TRANSICION DE LA
  ALTERNATIVA EN TURNO K1,K2 EN EL ARCHIVO DE ACCESO DIRECTO
C
  niw(1)=iw
  DO 65 in=1,ji
    kp=in+(k-1)*ji+iw*ji
    65 WRITE(100,'(F13.7,200F9.7)',REC=kp)be(in),(p(in,ip),ip=1,ji)
C
  IMPRIME LOS RESULTADOS EN EL ARCHIVO DE SALIDA
C
  IF(impres.EQ.1)THEN
    WRITE(imp,100)ksal(k1),ksal(k2)
    100 FORMAT(/,5X,'BENEFICIO ESPERADO',15X,'EXTRACCION PRESA 1= ',I4,
    &'* dV1',10X,'EXTRACCION PRESA 2= ',I4,'*dV2',/)
    DO 110 i=1,ji
      WRITE(imp,120)be(i),(p(i,j),j=1,ji)
    110 CONTINUE
    120 FORMAT(7X,F9.3,12X,100F6.3)
  END IF
C
  60 CONTINUE
  70 CONTINUE
  iw=iw+jk(1)

```

```

130 CONTINUE
RETURN
END

C
C SUBROUTINA PROGDIN: APLICA LA PROGRAMACION DINAMICA ESTOCASTICA
C AL SISTEMA DE PRESAS E IMPRIME LA POLITICA OPTIMA
C

SUBROUTINE PROGDIN(imp)
COMMON/UNO/na,dv,smin(2),ns(2),nk(2,12),ne,indi(2)
COMMON/CINCO/tol
COMMON/SIETE/niv(20),ksal(20),impres
COMMON/OCHO/ik(12,18,18),ie(18,18),jk(12),ji,niw(12)
INTEGER ext(2,12,200)
DIMENSION delat(200),bv(200),bn(200),bf(200)
DIMENSION p(200,200),be(200),bo(12,200)

C
C INICIALIZA VECTOR DE BENEFICIOS NETOS EN EL LARGO PLAZO
C
DO 10 i=1,ji
    bf(i)=-1000000.0
10    bv(i)=-1000000.0
    iter=1
50 CONTINUE
WRITE(*,*) 'ITERACION : ',iter

C
C ITERACION CONTADA SOBRE LAS ETAPAS O PERIODOS INTERANUALES
C
DO 45 l=ne,1,-1

C
C ITERACION CONTADA SOBRE LOS NIVELES INICIALES EN LAS PRESAS
C
DO 40 i1=1,ns(1)+1
    DO 40 i2=1,ns(2)+1
        i=ie(i1,i2)
        bn(i)=0.0

C
C ITERACION CONTADA SOBRE EXTRACCIONES DE LAS PRESAS
C
DO 30 k1=1,nk(1,1)+1
    DO 30 k2=1,nk(2,1)+1
        z=0
        k=ik(1,k1,k2)

C
C LEE EL BENEFICIO Y LAS PROBABILIDADES DE TRANSICION CORRESPONDIENTES
C
    kp=i+(k-1)*ji+niw(1)*ji
    READ(100,'(F13.7,200F9.7)',REC=kp)be(i),(p(i,ip),ip=1,ji)

C
C ITERACION CONTADA SOBRE LOS NIVELES FINALES DE LAS PRESAS
C
DO 20 j1=1,ns(1)+1
    DO 20 j2=1,ns(2)+1
        j=ie(j1,j2)
20    z=z+p(i,j)*bv(j)
    aux=be(i)+z
    IF(aux.GT.bn(i).OR.k.EQ.1)THEN
        bn(i)=aux
        ext(1,1,i)=ksal(k1)

```

```

        ext(2,1,i)=ksal(k2)
        bo(1,i)=be(i)
    END IF
30 CONTINUE
C
C    CALCULA EL INCREMENTO DEL BENEFICIO EN LA NUEVA ITERACION
C
    IF(1.EQ.1)delt(i)=bn(i)-bf(i)

40 CONTINUE
    DO 42 i=1,ji
42  bv(i)=bn(i)
45 CONTINUE
C
C    REvisa la tolerancia en el metodo de programacion dinamica
C
    indice=0
    DO 60 i=1,ji-1
        var=ABS(delt(i)-delt(i+1))
        WRITE(*,*)'var: ',var
        IF(var.GT.tol)THEN
            indice=1
            GOTO 60
        END IF
60 CONTINUE
    IF(indice.EQ.1)THEN
        DO 70 i=1,ji
70      bf(i)=bv(i)
            iter=iter+1
            GOTO 50
        END IF
C
C    IMPRIME EL NUMERO DE ITERACIONES
C
    WRITE(imp,72) iter
72 FORMAT(/,5X,'NUMERO TOTAL DE ITERACIONES DEL METODO: ',I5,/)
C
C    IMPRIME LA POLITICA OPTIMA DE OPERACION CONJUNTA
C
    DO 130 j=1,ne
        WRITE(imp,80) j
80  FORMAT(/,20X,'POLITICA DE OPERACION OPTIMA ETAPA ',I2,/,12X,'EST
        &ADO',16X,'EXTRACCION',10X,'BENEFICIO ESPERADO',/,13X,'Mm3',21X,'Mm
        &3',17X,'UNID.MONET.',/,5X,'PRESA 1',5X,'PRESA 2',5X,'PRESA 1',5X,'
        &PRESA 2',/)
        DO 100 ii=1,ns(1)+1
            DO 100 i2=1,ns(2)+1
                i=ie(ii,i2)
                est1=niv(ii)*dv+smin(1)
                est2=niv(i2)*dv+smin(2)
                sal1=ext(1,j,i)*dv
                sal2=ext(2,j,i)*dv
100  WRITE(imp,90) est1,est2,sal1,sal2,bo(j,i)
90  FORMAT(4X,F9.2,3X,F9.2,3X,F9.2,3X,F9.2,8X,F9.2)
130 CONTINUE
    RETURN
    END

```

```
C
C  SUBROUTINA BENE: CALCULA EL BENEFICIO POR PASAR DEL ESTADO i AL j
C                    O POR ENTREGAR UN VOLUMEN vet DE DEMANDA
C
C  SUBROUTINE BENE (1,vet,G)
COMMON/SEIS/kon,demanda(12)
C
IF (vet.LE.demanda(1)) THEN
    G=kon+(vet/demanda(1))*(100-kon)
ELSE
    G=100
END IF
RETURN
END
```