



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

28
67

Modelo Matemático para la Operación
Optima de una Presa de Almacenamiento
de Propósitos Múltiples

T E S I S

Que para obtener el TITULO de

INGENIERO CIVIL

P r e s e n t a

Leopoldo Fernández García

México, D. F.

1984



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

C O N T E N I D O

	PAG.
I. INTRODUCCION.	1
II. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL MODELO.	10
III. ALGORITMO DE SOLUCION MEDIANTE PROGRAMACION DINAMICA.	22
IV. EJEMPLO DE APLICACION.	42
V. CONCLUSIONES.	67
 B I B L I O G R A F I A .	 72

INDICE DE FIGURAS

		PAG. :
FIGURA A.	ESQUEMA DE POZOS.	4
FIGURA B.	ESQUEMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUA PLUVIAL.	5
FIGURA C.	ESQUEMA DE OBSTRUCCION A UNA CORRIENTE.	7
FIGURA D.	CURVA DE DEMANDA DE ENERGIA ELECTRICA.	23
FIGURA E.	CURVA TIPICA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA TURBINA FRANCIS.	27
FIGURA F.	CURVAS TIPICAS DE TURBINA FRANCIS CARGA-DESCARGA.	28
FIGURA G.	CURVAS TIPICAS DE TURBINA FRANCIS CARGA-POTENCIA.	29
FIGURA H.	ENERGIA DE PICO Y ENERGIA TOTAL EN FUNCION DEL RIEGO FIRME.	49
	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ALGORITMO DE SOLUCION DEL MODELO DE PROGRAMACION DINAMICA.	53

INDICE DE TABLAS

	PAG. :
TABLA 1. DATOS MENSUALES DE ESCURRIMIENTO.	47
TABLA 2. AREA DEL ALMACENAMIENTO Y CAPACIDAD DE LA PLANTA DE ENERGIA COMO FUNCION DEL ALMACENAMIENTO.	48
SALIDAS MENSUALES OPTIMAS PARA UNA DEMANDA ANUAL DE 0 MILLONES DE METROS CUBICOS.	61
SALIDAS MENSUALES OPTIMAS PARA UNA DEMANDA ANUAL DE 750 MILLONES DE METROS CUBICOS.	62
SALIDAS MENSUALES OPTIMAS PARA UNA DEMANDA ANUAL DE 1,250 MILLONES DE METROS CUBICOS.	63
SALIDAS MENSUALES OPTIMAS PARA UNA DEMANDA ANUAL DE 1,750 MILLONES DE METROS CUBICOS.	64

PAG. :

SALIDAS MENSUALES OPTIMAS PARA UNA
DEMANDA DE 2,250 MILLONES DE METROS
CUBICOS.

65

SALIDAS MENSUALES OPTIMAS PARA UNA
DEMANDA DE 2,750 MILLONES DE METROS
CUBICOS.

66

I. I N T R O D U C C I O N

I. INTRODUCCION.

Conforme a las políticas de desarrollo del país, el crear obras de infraestructura que permitan mejorar los actuales aprovechamientos de los recursos naturales, se ha convertido en un reto para el Ingeniero Civil.

Una de estas metas es optimizar de una manera racional los aprovechamientos hidráulicos con propósitos múltiples, como son las presas de almacenamiento, las que permiten captar los escurrimientos naturales de los ríos, que tanto abundan en la República Mexicana, con el objeto de satisfacer las demandas de distritos de riego operantes, o para la creación de otros nuevos, así como disponer de agua potable y/o volúmenes para generación de energía eléctrica; control de crecientes y otros más.

Dado que los recursos económicos de los que dispone nuestro país no son abundantes, es deber del Ingeniero el lograr la máxima eficiencia y economía, que de hecho involucran los buenos diseños, por lo que en este tra

bajo se presenta una técnica tendiente a alcanzar este objetivo aplicado a la operación óptima de una presa de almacenamiento de propósitos múltiples.

ALGO DE HISTORIA.

La Ingeniería Hidráulica se encarga de estudiar los aprovechamientos de presas, cuyos objetivos varían de acuerdo a su naturaleza y origen, siendo éstos, entre otros el control de crecientes producidas por las lluvias, la generación de energía hidroeléctrica, disponibilidad de agua para riego, el almacenamiento de agua con el objeto de regular los volúmenes de escurrimiento y aprovecharlos posteriormente como fuentes de abastecimiento con estructuras derivadoras a través de canales de alivio y otros más.

Dado que el agua es indispensable para la supervivencia de cualquier clase de vida, ha sido preocupación del hombre, desde tiempos muy remotos, el aprovechamiento de ella. Existen aún vestigios de aprovechamientos hidráulicos de épocas pasadas, como se aprecia en ruinas de pequeñas represas y grandes acueductos, que indican que desde entonces el hombre buscaba la manera de abastecer los volúmenes de agua necesarios para los diferentes tipos de requerimientos de sus servicios.

Hoy en día, existen más y mejores tipos de aprovechamientos hidráulicos que son estudiados por la Ingeniería Hidráulica, baste como ejemplo, la perforación de pozos profundos (Fig. A), en lugares en donde se cuenta con un nivel freático adecuado, o bien, mediante canalizaciones en lugares en los que se cuenta con grandes precipitaciones y se pueden desarrollar almacenamientos a través de cisternas para el abastecimiento del agua necesaria en el resto del año (Fig. B); sin embargo, siguen persistiendo aprovechamientos de corrientes o almacenamientos naturales cercanas a los núcleos de demanda, en los que el agua es transportada en pequeños depósitos, con tracción humana, animal o mecánica.

Estos métodos se complican en lugares en donde los acuíferos son pobres o muy profundos, o en lugares en donde la precipitación pluvial es escasa o bien, donde la corriente es intermitente o se encuentra muy lejana, entonces, se piensa en otros tipos de aprovechamientos, como lo representan el tratamiento de las aguas marinas para fuente de abastecimiento, las que son muy estudiadas actualmente, tratando de obtener un método eficiente de desalinización y potabilización, como en Escocia en donde se han desarrollado métodos bastante eficientes y justificativamente económicos, mientras que para el caso de México, las inversiones y costos de operación no justifican aún el mar como fuente general de abastecimiento, pues requerirían largas con-

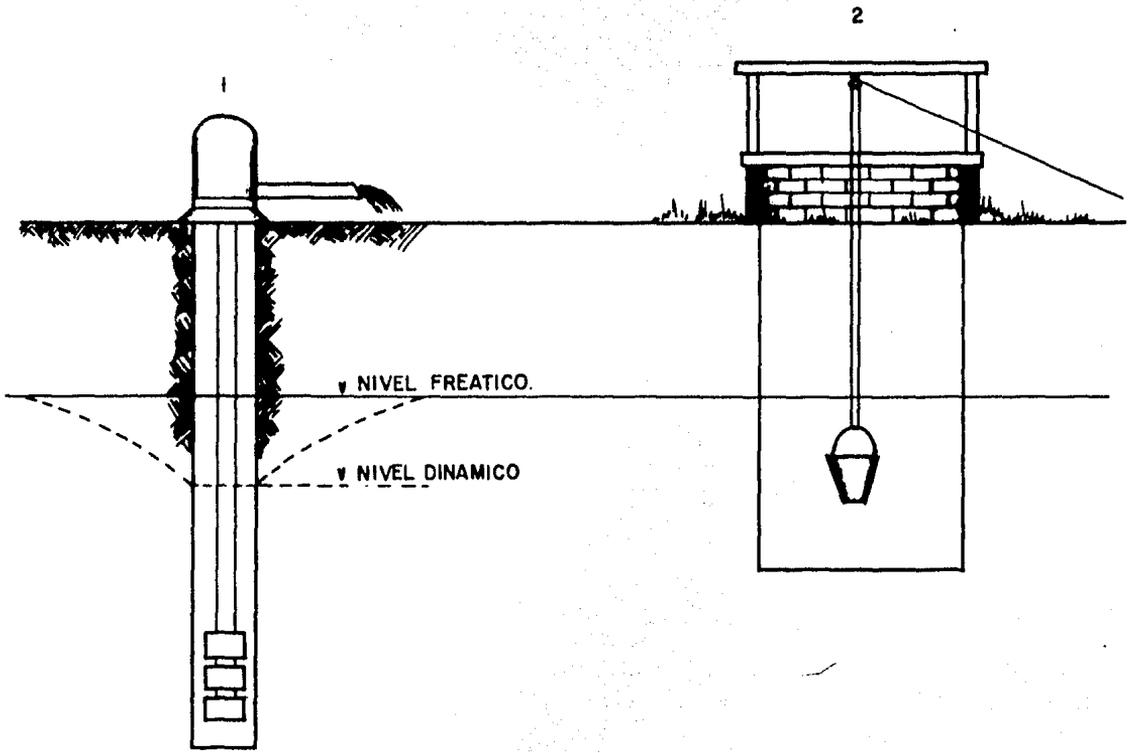


FIGURA A. ESQUEMAS DE POZOS 1- MECANICO. 2- MANUAL.

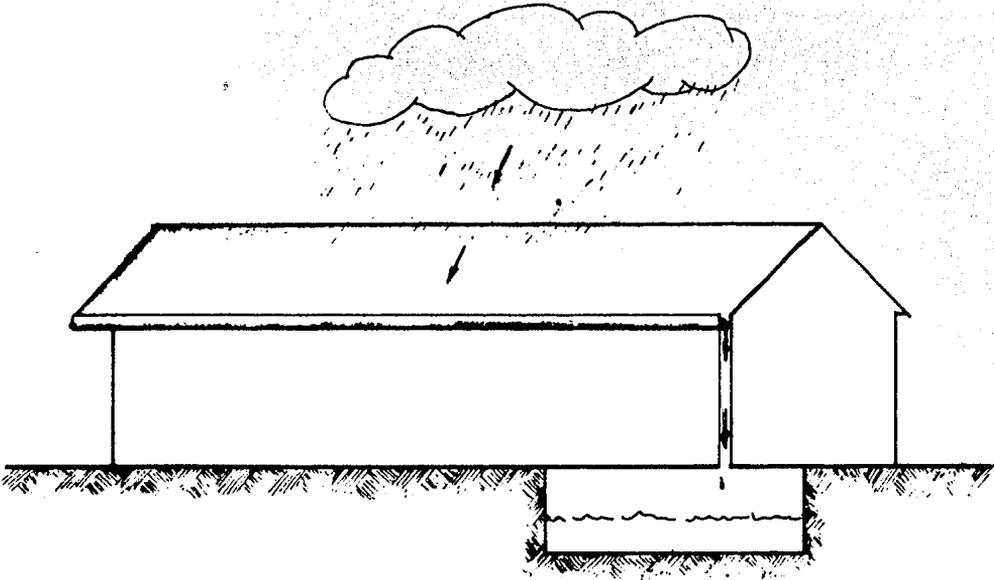


FIGURA B. ESQUEMA DE APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA.

ducciones dado que los centros principales de demanda, se encuentran lejanos y los desniveles en nuestro país son bastante grandes; bajo esta disyuntiva es conveniente el tratar de aprovechar el agua de los lagos naturales, o bien, en lograr lagos artificiales mediante la obstrucción de corrientes, formando embalses y aprovechando el agua almacenada (Fig. C).

Las presas, que representan obstrucciones a corrientes, permiten obtener almacenamientos de volúmenes o bien controlarlos en forma más económica y eficiente.

Pensando en los diferentes usos a que se puede destinar el agua, se pueden proyectar almacenamientos lo suficientemente grandes para que se regule el abastecimiento de agua potable a los centros de población cercanos al embalse, o bien el disponer de agua para riego de parcelas, o en ganar altura del nivel de agua para aprovechar la energía potencial y transformarla en energía cinética mediante conducción a turbinas, que a su vez muevan generadores de energía eléctrica.

Otro tipo consiste en aprovechar el almacenamiento para el control de las avenidas, o como centros de atracción turística, fomentando actividades como la pesca, la natación, el esquí, que tanto auge está teniendo en la actualidad.

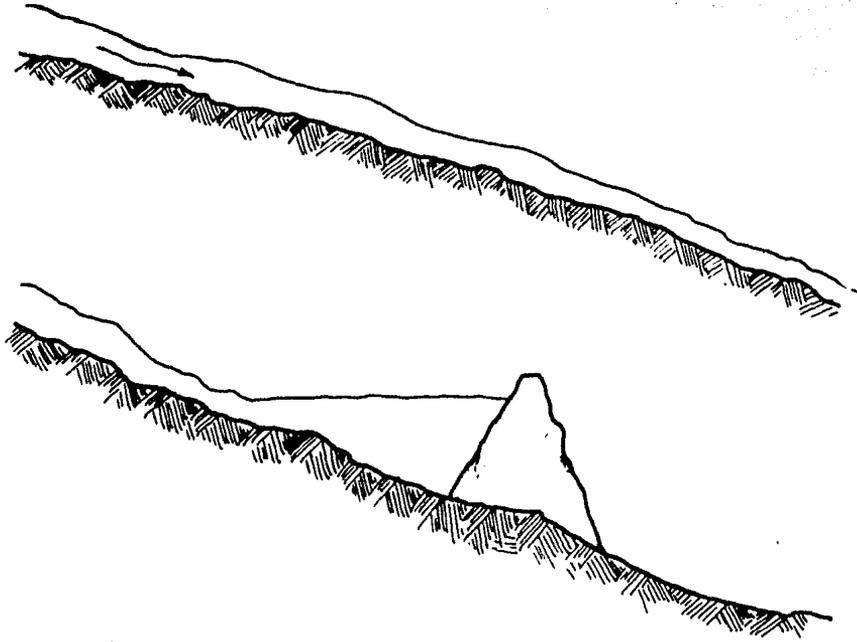


FIGURA C. ESQUEMA DE OBSTRUCCION A UNA CORRIENTE.

De esta manera, se ha esquematizado una presa de almacenamiento, la cual se convierte en propósitos múltiples cuando se buscan dos o más de los aprovechamientos como son: abastecimiento de agua para diferentes usos, generación de energía eléctrica, abastecimiento de agua para riego, control de avenidas, centros de atracción turística y muchos más.

Sin embargo la función del ingeniero deberá encaminarse al correcto manejo del agua para lograr satisfacer todos los propósitos del embalse, sin olvidar que las entradas de agua están sujetas a variaciones en la corriente y que las salidas, además de las planeadas, son aumentadas por la evaporación y la infiltración del agua almacenada, de las cuales no siempre se tiene el control suficiente, por lo que todos estos parámetros deberán manejarse adecuadamente, para que las salidas obligadas no mermen en gran escala el almacenamiento y llegue en un momento dado a agotarse, o que bajen de cierto nivel mínimo preespecificado necesario para la generación de energía eléctrica, o bien que por otro lado no se disponga de volumen libre en el almacenamiento, para el correcto control de avenidas.

Para combinar las entradas con las salidas, de un embalse de estas características, se recurre a la Hidrología, la que frecuentemente se encuentra con la problemática de

que los datos hidrológicos no son suficientes para la definición exacta de la ley de entradas, por lo que será necesario el aplicar técnicas o métodos de generación sintética de datos, que definan bajo una ley de probabilidades, las entradas al almacenamiento, durante un período equivalente a la vida útil del proyecto; respecto a las salidas, tienen menor problema, puesto que se proyecta el embalse para satisfacer una o varias demandas, como lo representa el abastecimiento de agua potable, agua para riego, para generación de energía eléctrica, tomando en cuenta las pérdidas por evaporación y filtración, las que pueden ser valuadas de manera más sencilla.

Para el manejo de todos estos conceptos, se desarrolla en el presente trabajo, un modelo matemático⁽¹⁾ tendiente a definir la política óptima de operación de un almacenamiento, tomando en cuenta todas las condicionantes antes mencionadas, siendo aplicable a nuevos proyectos o bien para mejorar la política de operación en el caso de los sistemas existentes, bajo las limitaciones del embalse sujeto a estudio.

(1)

Elaborado por HARBOE en 1970.

II. FORMULACION DEL MODELO

II. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL MODELO.

En la operación de un embalse de múltiples propósitos, en el que los volúmenes extraídos para riego tienen prioridad sobre los otros destinos del agua, se requiere determinar la política de operación que permita obtener la máxima energía eléctrica compatible con la ley de demanda del riego, satisfaciendo en su caso, los otros propósitos del embalse.

Sobre la solución del problema, se han desarrollado modelos matemáticos para embalses simples en los que la determinación de la máxima producción de energía eléctrica, ha sido únicamente la función por alcanzar. Se denomina energía firme a la cantidad mínima de energía eléctrica a la que se puede comprometer a producir el almacenamiento en base a la ley de demanda del riego, a lo que se referirá en adelante como función objetivo. También se han desarrollado modelos bajo estas bases de análisis de reglas óptimas de operación a corto y largo plazo. En el primero, el objetivo es encontrar las extracciones óptimas horarias del embalse (tránsito de avenidas), mientras que en el largo plazo, el objetivo es la determinación de las extraccio-

nes mensuales del almacenamiento durante un período largo, que puede ser la vida económica del proyecto, o bien un período crítico en escurrimientos (funcionamiento de vaso); el caso que nos ocupa, se refiere al largo plazo y se puede decir, que el problema se reduce a encontrar la extracción óptima mensual del embalse, tal que la producción de energía eléctrica sea maximizada, tomando en cuenta la salida mensual comprometida para riego y conservando fijo a través de todo el análisis el volumen reservado en cada mes para el control de avenidas, mediante la imposición de restricciones a los niveles de almacenamiento y extracciones mensuales.

Para ello se determina una función de producción para cada uno de los productos del análisis: agua para riego y generación de energía eléctrica.

Las ecuaciones básicas y las restricciones que describen las características del sistema son:

1. ECUACION DE CONTINUIDAD.

Basada en el volumen almacenado en un mes cualquiera, el volumen de entrada, el volumen de salida, la evaporación y la infiltración en su caso:

$$A_i = A_{i-1} + E_i - S_i - EVA_i \quad (1)$$

donde:

- A_i = Volumen almacenado en el mes i .
 A_{i-1} = Volumen almacenado en el mes $i-1$.
 E_i = Volumen de entrada en el mes i .
 S_i = Volumen total de salida durante el mes i .
 EVA_i = Pérdida por evaporación e infiltración, durante el mes i .

Dicho ésto en otra forma, el volumen almacenado al final de un mes cualquiera, será igual a la suma de: el volumen almacenado al final del mes anterior, más el volumen que haya entrado al almacenamiento durante todo el mes debido a las aportaciones de los ríos, corrientes subterráneas, deshielos, precipitación pluvial, etc.; menos los volúmenes extraídos durante el mes para los diferentes propósitos del embalse y menos el volumen perdido, debido a la evaporación e infiltración del agua en su caso.

Para cuantificar las pérdidas mensuales por evaporación e infiltración, se usará la siguiente expresión:

$$EVA_i = \bar{A}E_i (A_i, S_i) KE_i + I_i.$$

dónde:

EVA_i = Pérdida por evaporación e infiltración durante el mes i .

$\bar{A}E_i (A_i, S_i)$ representa el promedio de superficie expuesta de agua del embalse en el mes i , en función del

volumen almacenado (A_i) y las extracciones realizadas (S_i)

RE_i = Rango de evaporación en el mes i .

I_i = Volumen perdido por infiltración en el mes i .

Para cuantificar las pérdidas por infiltración, se tomarán en cuenta las condiciones propias del embalse, y como una función de la columna de agua que produce la infiltración, ésto es, I es una función de la carga en el embalse.

2. RESTRICCIONES EN EL VOLUMEN DE ALMACENADO.

El embalse se caracteriza por:

- a) Su volumen muerto,
- b) Nivel máximo,
- c) Nivel mínimo,
- d) Función de volumen almacenado-área expuesta y ,
- e) Función de volumen almacenado-elevación, los que pueden expresarse como:

$$VM \leq A_i \leq AMAX; \quad (2)$$

$$A_{i+1} \leq AMAX; \text{ para toda } i,$$

$$AMAX = ATOT - ACA_i.$$

dónde:

VM = Volumen Muerto.

A_i = Volumen almacenado en el mes i .

AMAX $\hat{=}$ Volumen máximo de almacenamiento.

A_{i+1} = Volumen almacenado en el mes $i+1$.

ATOT = Capacidad total del embalse.

ACA_i = Volumen reservado para el control de avenidas en el mes i .

Esto es, que el almacenamiento en cualquier mes, tendrá que ser mayor o igual que el volumen muerto, pero menor o igual que el volumen para el nivel máximo de almacenamiento, siendo la capacidad máxima la diferencia entre el almacenamiento total del embalse y el volumen reservado para el control de avenidas. Las funciones volumen almacenado-área expuesta y volumen almacenado-elevación, son propias de cada embalse y dependen de la topografía del vaso.

3. RESTRICCIONES EN LA SALIDA.

Las extracciones de un mes en particular deben satisfacer la ley de salidas obligadas en ese mes; entonces se tiene:

$$S_i \geq \text{Máx} (SO_i \text{ o } VF_i). \quad (3)$$

dónde:

S_i = Volumen total de salida durante el mes i .

SO_i = Salida obligada en el mes i .

VF_i = Volumen firme en el mes i , que es el volumen de agua comprometida en el mes i .

O sea, que el volumen extraído del embalse en el mes i , tiene que ser el mayor de los dos factores: el volumen de salida obligada del mes, o el volumen de agua comprometida del mes.

4. PRODUCCION DE ENERGIA.

La capacidad de producción, es una función de la carga promedio sobre las turbinas y la eficiencia de la planta, ésto es, que mientras mayor sea el tirante de agua sobre la turbina, mayor será la posibilidad de producción de energía, siendo importante para la eficiencia de la planta, la que puede expresarse de la siguiente manera:

$$PE_i = C \cdot S_i \cdot H_i \cdot n \quad (4)$$

dónde:

PE_i = Capacidad de producción de energía en el mes i .

C = Factor de conversión de energía potencial a energía cinética.

S_i = Volumen total de salida durante el mes i .

H_i = Carga promedio en las turbinas en el mes i .

n = Eficiencia de la planta.

El gasto interviene en esta ecuación, siendo una función de la altura.

Para simplificar el cálculo, se introduce una función de producción de energía, cuyo resultado es la cantidad de KW-Hora que pueden ser producidos por un millón de metros cúbicos de agua extraída en un nivel determinado de almacenamiento:

$$EP_i = S_i \cdot RPE(A_i)$$

dónde:

EP_i = Energía que puede ser producida en el mes i .

S_i = Volumen total de salida durante el mes i .

$RPE(A_i)$ = Rango de producción de energía, que es una función de almacenamiento en el mes i .

Sin embargo es necesario tomar en cuenta que la energía que se pueda producir estará limitada por la capacidad instalada de la planta, el nivel de agua en el embalse y el número de horas disponibles de producción, entonces, la máxima energía que es posible obtener es:

$$EMAX_i = HDP_i \cdot n \cdot CAP \quad (5)$$

dónde:

$EMAX_i$ = Máxima energía que puede ser producida en el mes i .

CAP = Capacidad de la planta

HDP_i = Número de horas disponibles para producción en el mes i .

n = Eficiencia de la planta.

La energía a ser producida en cualquier mes, es el menor valor de la energía que puede ser producida, entonces:

$$EP_i = \text{Min} (EP_i \text{ ó } EMAX_i) \quad (6)$$

dónde:

EP_i = Energía que puede ser producida en el mes i .

$EMAX_i$ = Máxima energía que puede ser producida en el mes i .

La energía anual a ser satisfecha en todos los períodos (energía firme), es un patrón mensual, prescrito por el número de horas de producción en el mes:

$$EFA = \frac{EP_i}{HDP_i} \cdot HDP_A \quad (7)$$

dónde:

EFA = Energía Firme Anual.

EP_i = Energía que puede ser producida en el mes i .

HDP_i = Número de horas disponibles para producción en el mes i .

HDP_A = Número de horas disponibles de generación en el año.

Esta es la función que determina la energía firme anual, la que, para cumplir con el objetivo de este análisis, deberá ser máxima en cualquier etapa del problema, para ésto, se tendrá que maximizar el mínimo de los valores de la energía producida en cualquier etapa a lo largo de todo el análisis.

Para resolver esta función hay que hacer la secuencia

de pasos que a continuación se enumeran:

1. De la expresión 3 se selecciona un volumen de salida para el mes en que se esté trabajando (S_i), que tendrá que estar dentro de los valores máximos de:
 - a) La salida obligada en el mes para mantener el volumen libre suficiente para el correcto control de avenidas (SO_i).
 - b) El volumen comprometido en el mes para riego y las demás demandas del embalse (VF_i).

2. Una vez seleccionado el volumen de salida (S_i), se recurre a la ecuación 1 para determinar el volumen que quedará almacenado (A_i) después de la extracción; en esta ecuación intervienen los siguientes factores a determinar:
 - a) Volumen almacenado al principio del mes i (A_{i-1}).
 - b) Volumen de entrada por aportaciones de ríos, precipitación pluvial, corrientes subterráneas, deshielos, etc. (E_i).
 - c) Volumen de salida (S_i) determinado en el paso N° 1.
 - d) Volumen perdido durante el mes debido a la evapo

ración e infiltración (EVA_i); la primera es una función del área expuesta y la segunda de la carga de agua, funciones que dependen de la topografía del vaso y que están representadas por las gráficas volumen almacenado-área expuesta y volumen almacenado-elevación.

3. Calculado el volumen almacenado (A_i) después de la extracción, se recurre a la expresión 2 y se compara con el volumen muerto del embalse (VM) éste tendrá que ser menor o igual que el primero; se compara también con el volumen máximo del almacenamiento ($AMAX$), cuyo valor es fijo y nunca podrá ser rebasado.

En caso de no cumplirse con cualquiera de las dos condiciones, tendrá que regresarse al punto N° 1 y seleccionar otra extracción (S_i) y repetir la secuencia hasta que se cumplan estas condiciones.

4. Se calcula ahora la capacidad de producción de energía (EP_i) que se logra con la extracción (S_i) seleccionada. Para esto se utiliza la ecuación 4, en la que intervienen:

- a) El volumen total de salida en el mes (S_i).

b) La carga promedio en las turbinas durante el mes (H_i), que está representado por la gráfica Volumen almacenado-elevación.

5. Utilizando la expresión 6, se compara el valor de la capacidad de producción obtenido en el punto N° 4 (EP_i), con el valor de la máxima energía que puede ser producida en el mes ($EMAX_1$) según la ecuación 5, y se elige el menor. Esto es porque no se puede producir más de lo que la capacidad instalada de la planta pueda producir, pero tampoco se puede producir más de lo que la extracción seleccionada (S_i) permita.
6. Este valor de producción de energía se sustituye en la ecuación 7 para determinar la energía firme anual (EFA) que puede ser producida con la extracción seleccionada (S_i).
7. Se calcula otro valor de extracción (S_i) para este mismo mes, fijándose un incremento ΔS que permita pasar por todos los valores posibles de extracciones y se repite el proceso tantas veces como valores de salidas se obtenga con el incremento fijado.

De los diferentes valores de energía firme anual (EFA) obtenidos de esta secuencia, se selecciona el óptimo, entonces la decisión de extracción seleccionada será el principio de la determinación de una política óptima de operación de la presa, la que se definirá haciendo lo mismo para cada mes, y tendrá que repetirse las veces necesarias para determinar la política óptima de operación de la presa a lo largo del período de análisis

III. ALGORITMO DE SOLUCION MEDIANTE PROGRAMACION DINAMICA

III. ALGORITMO DE SOLUCION MEDIANTE PROGRAMACION DINAMICA.

La mayor parte de la demanda de energía eléctrica en nuestro país, es satisfecha por plantas termoeléctricas, ya que la inversión es generalmente menor que la necesaria para el establecimiento de las plantas hidroeléctricas, éstas en cambio tienen un bajo costo de operación, y una alta maniobrabilidad, lo que hace preferible que absorban las variaciones de los picos de demanda de energía, que para el caso de un país en vías de desarrollo como México, se presentan aproximadamente de las 4 de la tarde a las 11 de la noche (Fig. D), horas en que oscurece y la demanda comercial y doméstica se eleva, a diferencia de los países desarrollados en los que la demanda industrial es mayor.

En estas horas de máxima demanda, la potencia tiene gran valor, debido a que en esos momentos se dispone de un mínimo de reserva, y la probabilidad de falla es máxima, por ésto la determinación de los beneficios de un proyecto hidroeléctrico, tiene como base el costo de oportunidad de producir energía de pico y dejar la potencia firme para que sea satisfecha con otros medios, principalmente por plantas termoeléctricas.

Para el cálculo de los beneficios, deberá hacerse una simulación hidrológica de la operación más conveniente del

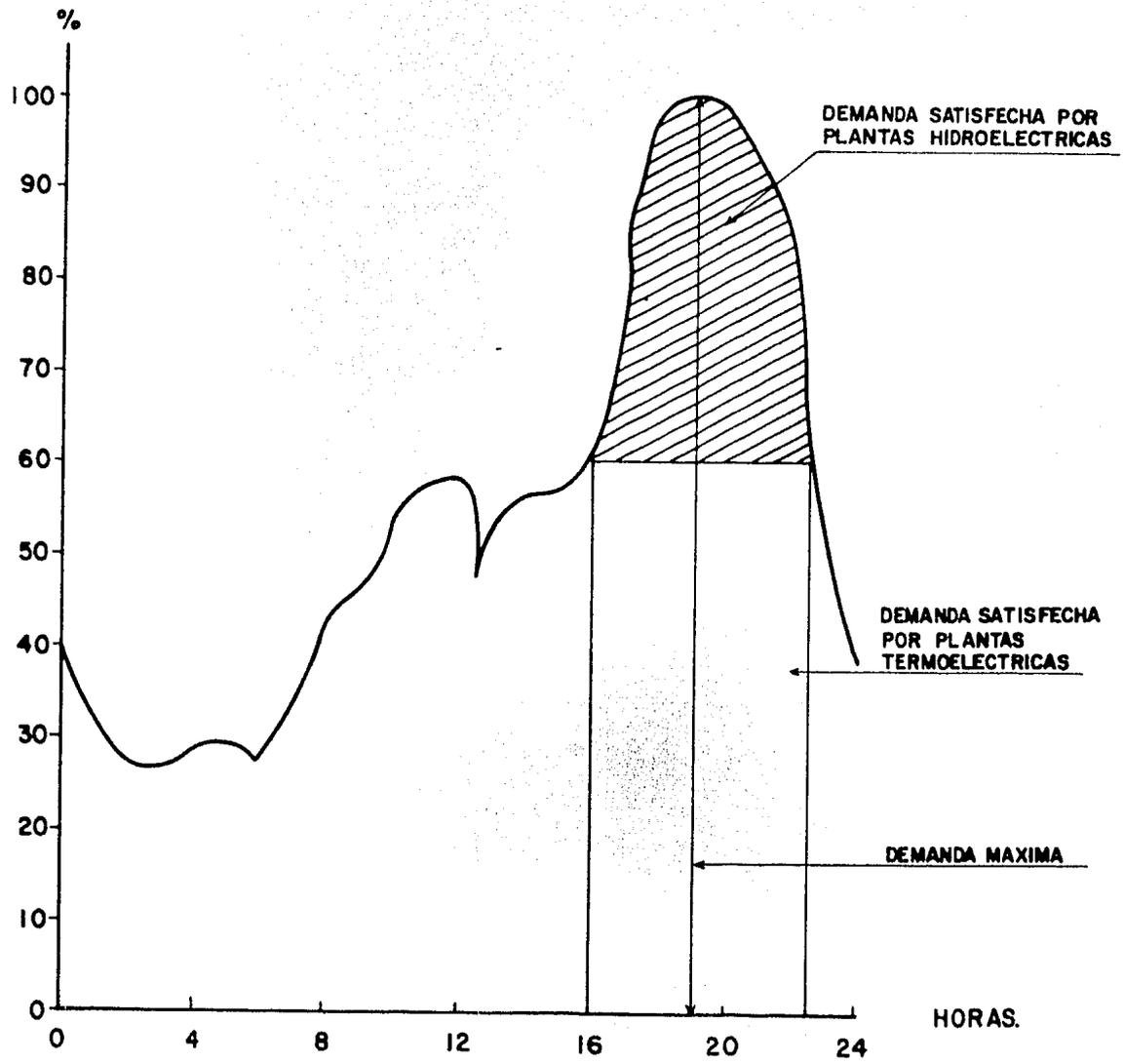


FIGURA D. CURVA DE DEMANDA DE ENERGIA ELECTRICA POR HORA.
FUENTE: ESTUDIO PARA EL ABASTECIMIENTO DE ENERGIA ELECTRICA PARA EL DESARROLLO "LAGUNA DEL TEPACHE."
ING. CARLOS SANCHEZ PRIETO.

vaso, considerando el sistema integrado de potencia y su funcionamiento en conjunto, de tal manera que se satisfaga la demanda prevista a lo largo de la vida útil de la obra.

La energía que se puede producir, es la cantidad de trabajo realizado durante un período de tiempo, y la cantidad de trabajo que se puede realizar es la potencia, la que está definida en función del gasto, a través de la siguiente expresión:

$$P = \gamma QH$$

dónde:

P = Potencia (kg m/seg).

γ = Peso específico (kg/m³)

Q = Gasto (m³/seg)

H = Carga (m).

Partiendo de esta fórmula, involucrando la eficiencia de la planta, y transformando la potencia a kilowatt, tenemos la siguiente expresión:

$$P = 9.811 QH n$$

dónde:

P = Potencia (kilowatt).

Q = Gasto (m³/seg).

H = Carga (m).

n = Eficiencia.

Entonces la energía queda expresada de la siguiente manera:

$$E = Pxt = 9.811 QHnt$$

dónde:

E = Energía (kilowatt-hora).

P = Potencia (kilowatt).

t = Tiempo (horas).

Q = Gasto (m^3 /seg).

H = Carga (m).

n = Eficiencia.

Para satisfacer la demanda total de energía, se deberá tener suficiente potencia, ya que el abastecimiento de energía no puede darse durante los periodos de baja demanda y almacenarse para usos futuros. El abastecimiento de energía disponible, debe, al menos igualar la demanda de pico del sistema, lo que involucra que se tenga una potencia media demandada (carga base), el 100% del tiempo y una potencia máxima (carga de pico), cuya relación define al factor de carga:

$$F.C. = \frac{\text{Carga promedio (KW)}}{\text{Carga de pico (KW)}}$$

Tomando la carga promedio para el periodo considerado y la energía máxima que es posible satisfacer se determina el factor de planta, así:

$$F.P. = \frac{\text{Generación anual (KW-HR)}}{\text{Capacidad instalada (KW-HR) x 8766 (HRS/AÑO)}}$$

Finalmente, con el objeto de hacer entrar en juego las características de las unidades de generación, se utilizan las curvas típicas de las turbinas (Fig. E), las que pueden ser:

1. Pelton, que utiliza mucha carga y poco gasto.
2. Kaplan, que necesita mucho gasto con poca carga y,
3. Francis, que se puede considerar un término medio entre las dos primeras (por ésto, se escoge este tipo de turbina para el ejemplo).

Bajo esta consideración y con la carga de diseño para la presa, se selecciona la turbina más adecuada. Las Figuras F y G son del artículo escrito por RICHARD E. KONEGER, referente a la selección de turbinas Francis; estas curvas son adimensionales para la operación de la turbina con la compuerta totalmente abierta. De acuerdo con estas curvas, las desviaciones de la carga y velocidad de diseño mantienen una relación óptima cuando:

Carga máxima = 1.25 Carga de diseño.

Carga mínima = 0.65 Carga de diseño.

Esta es una restricción que deberá tomarse en cuenta cuando se fije la política de operación de una presa, considerando que la extracción para riego tiene prioridad sobre la destinada a generación eléctrica, pero ésta tendrá que ser la máxima posible compatible con la demanda de aquella; para ésto, se puede proponer que toda el agua extraída del embalse, genere electricidad y posteriormen-

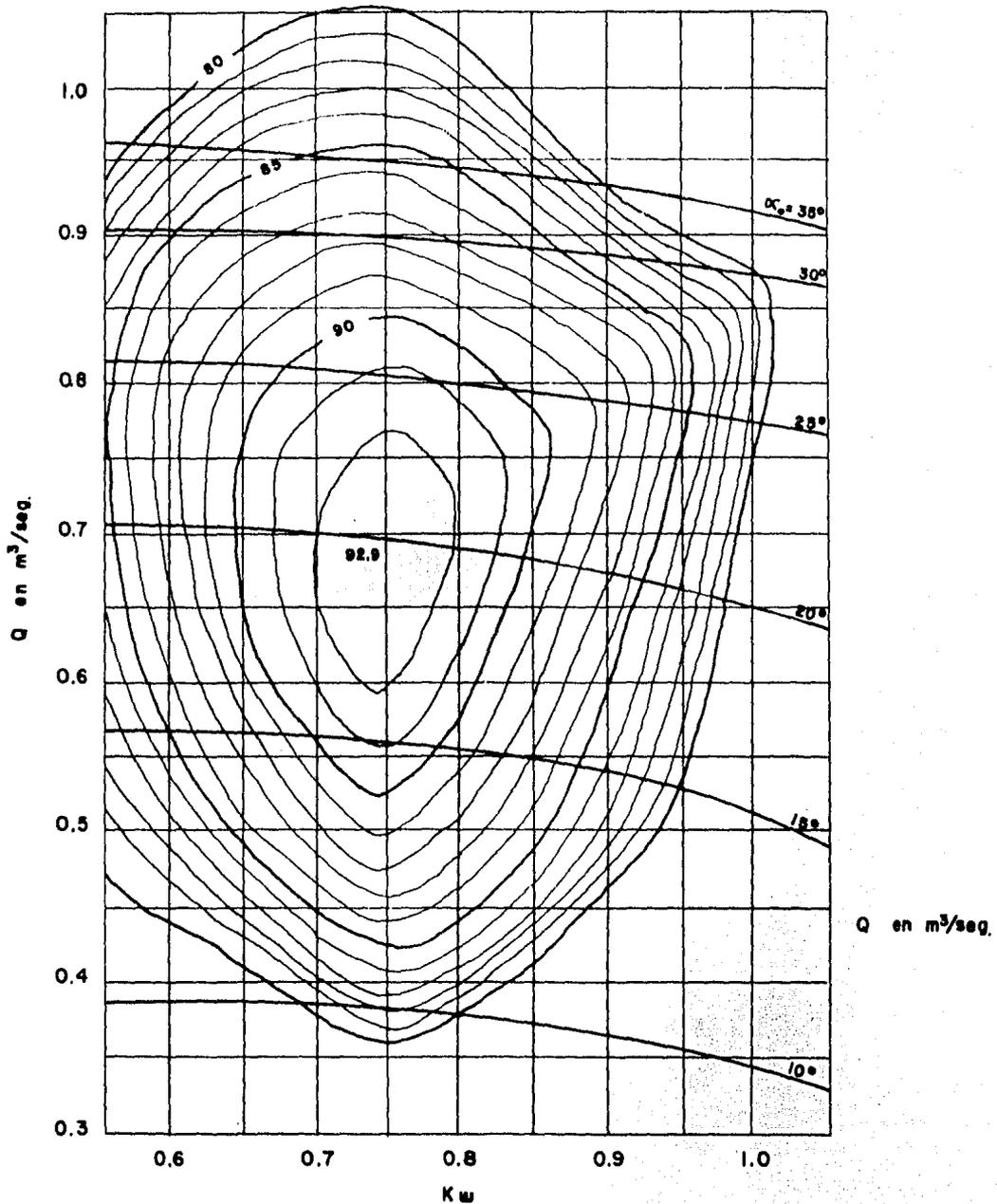


FIGURA E. CURVAS TÍPICAS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA TURBINA FRANCIS.
 (α_0 ES EL ÁNGULO DE LOS ALABES DEL DISTRIBUIDOR DESDE SU POSICIÓN CERRADA).

FUENTE : COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD.
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS.
 MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES.
 HIDROTECNIA
 A-2-4- MÁQUINAS HIDRAULICAS. PÁG. 2.4.6.

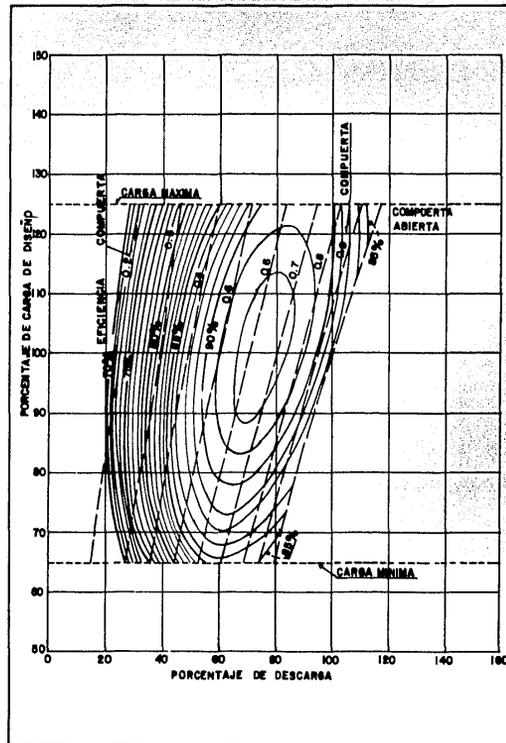


FIGURA F. CURVAS TÍPICAS DE TURBINA FRANCIS CARGA-CONTRA DESCARGA PARA UN RANGO DE 75 a 150 m. DE CARGA.

FUENTE : RICHARD E. KONEGER .
 DOMINGO A. PERDOMO Y JOSE PASCAL .
 MÉTODO ITERATIVO PARA OPTIMIZAR UN PROYECTO HIDROELECTRICO .
 INSTITUTO DE RECURSOS HIDRAULICOS Y ELECTRIFICACION .
 PANAMA, REP. DE PANAMA P.A.S. S.

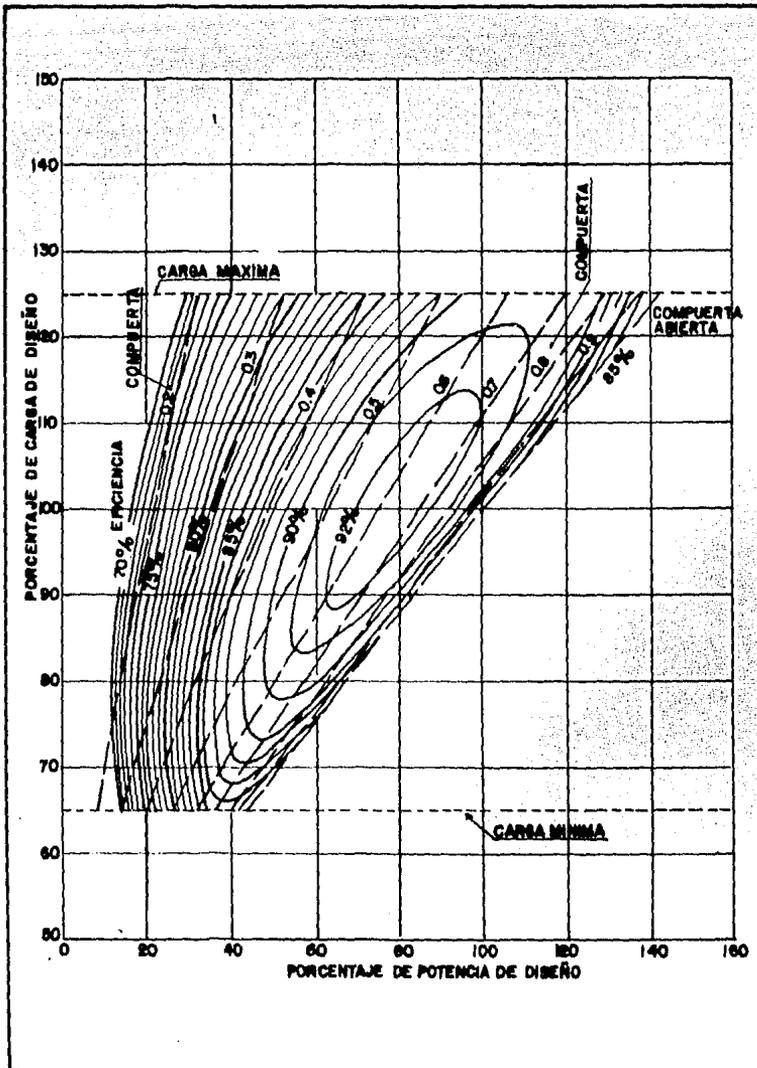


FIGURA 6. CURVAS TÍPICAS DE TURBINA FRANCIS CARGA-POTENCIA PARA UN RANGO DE 75 a 150 m DE CARGA.

FUENTE : RICHARD E. KONEGER .
 DOMINGO A. PERDOMO Y JOSE PASCAL.
 METODO ITERATIVO PARA OPTIMIZAR UN PROYECTO HIDROELECTRICO .
 INSTITUTO DE RECURSOS HIDRAULICOS Y ELECTRIFICACION .
 PANAMA, REP. DE PANAMA PAG. 7.

te, esa misma agua llegue a algún distrito de riego y cumpla con su finalidad.

Con el fin de resolver este problema en conjunto, se han estudiado algunos modelos matemáticos, por ejemplo, Warren A. Hall ha estudiado modelos de programación dinámica aplicados a encontrar las reglas óptimas de operación en un embalse simple, donde el fin, es la determinación de la máxima producción de energía firme; lo que en programación dinámica se llama FUNCION OBJETIVO. También se han desarrollado modelos del mismo tipo (programación dinámica), para la obtención de reglas óptimas de operación a corto y a largo plazo.

En 1970, Ricardo E. Harboe elaboró un algoritmo de solución mediante el método de programación dinámica, determinando la política óptima de operación para un embalse de propósitos múltiples, para el largo plazo. Este modelo sirvió de base para la realización de este trabajo, en el que se manejan escurrimientos generados sintéticamente y la política óptima de operación se obtiene para un diseño fijo, siendo los objetivos físicos del análisis la determinación de las extracciones óptimas y los almacenamientos mensuales del embalse durante el período de operación.

Para determinar la política de operación, el modelo

propone un método de optimización, descomponiendo el problema en etapas a lo largo del tiempo, tomando decisiones relacionadas con la asignación de recursos, que es lo que necesita el modelo de programación dinámica para ser aplicado.

La programación dinámica tiene las siguientes ventajas:

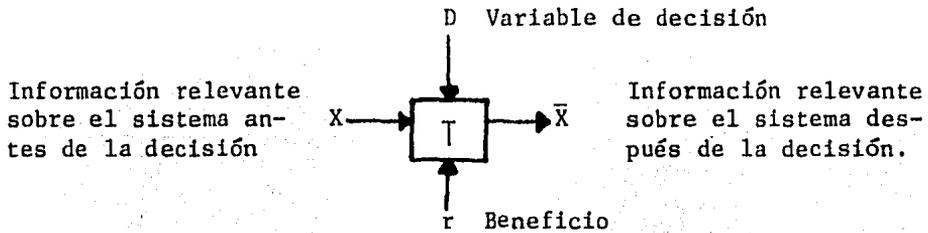
1. Un problema de N incógnitas es reducible a N problemas simples, lo que permite tener una sola variable, a la que se llamará variable de estado.
2. Generalmente proporciona solo un máximo o mínimo absolutos.
3. Las restricciones simplifican el problema, a diferencia de otros métodos, que lo complican.
4. Se puede generalizar fácilmente, esto es, al resolver un caso, se aplica fácilmente a otros similares.
5. Es directamente programable, lo que permite la aplicación de computadores.

Con la desventaja de que a medida que aumenta la dimensionalidad de la variable de estado, son mayores las

dificultades de programación en computador, cuyo esfuerzo crece exponencialmente.

Para resolver este tipo de problemas, se establece un modelo matemático cuyos principales componentes son:

1. Un estado inicial " X ", que proporciona toda la información relevante sobre el sistema antes de la toma de decisión.
2. Un estado final " \bar{X} ", que proporciona toda la información relevante del sistema después de haberse tomado la decisión.
3. Una variable de decisión " D " = (d_1, d_2, \dots, d_n) " que puede manipularse para obtener determinado cambio del sistema de su estado inicial X , a su estado final \bar{X} .
4. El beneficio " r ", que es una función escalar que depende del valor de los estados iniciales, de las decisiones tomadas y de los estados finales. $r = r(X, D, \bar{X})$.
5. Una función de transformación " T ", univaluada, que relaciona los estados finales con los iniciales y las variables de decisión: $\bar{X} = T(X, D)$.



La programación dinámica establece funciones, a las que llama Funciones Criterio, las que tendrán que ser optimizadas (maximizadas o minimizadas), por ejemplo, supongamos una función:

$$g(X_0; d_1, d_2, d_3) = d_1^2 + d_2^2 + d_3^3$$

Esta función criterio depende solamente de las decisiones d_1 y del valor inicial X_0 , que llevados a su forma más general quedaría:

$$g(X_0, X_1, \dots, X_n; d_1, d_2, \dots, d_n) = \sum_{s=1}^n d_s^2$$

Esta notación refleja el hecho de que frecuentemente las funciones serán definidas más fácilmente de acuerdo a sus dependencias con estas variables. Así, aunque X_1, \dots, X_n son funciones del estado inicial X_0 y de las decisiones d_1, \dots, d_n , usualmente se establece $X_0^2 + X_1^2 + X_2^2$ en lugar de:

$$X_0^2 + [T(X_0, d_1)]^2 + \{[T(T(X_0, d_1), d_2)]\}^2$$

La llave para la formulación de ecuaciones funcionales de programación dinámica que son usadas en un proceso de N etapas con N decisiones, es el Principio de Optimalidad de Bellman el cual establece que una vez alcanzado el estado X_i , no es de consecuencia para nuestras futuras decisiones el método que se usó para llegar a éste. Para las $N-i$ etapas restantes, empezando en X_i , tomamos las mejores decisiones $d_{i+1} \dots d_n$, dada solamente la información X_i , y éstas se volverán $(d_{i+1} \dots d_n)$, una serie de decisiones que, junto con d_i , es óptima en el proceso de n etapas.

En el caso que nos ocupa, hemos supuesto que la programación dinámica nos marcaría una política óptima en el manejo de un embalse, para ésto definamos:

a) Variable de estado:

Volumen almacenado al principio de cada período (A_i).

b) Variable de decisión:

Volumen extraído en cada período (S_i).

c) Etapa:

Períodos de tiempo mensuales (i).

d) Función de transformación de estado:

Ecuación de balance de masas (continuidad).

e) Función objetivo:

Maximizar la energía firme comprometida anual (EFA).

Podemos decir ahora, que el problema se reduce a encontrar la extracción óptima mensual del embalse, tal que la producción de energía eléctrica sea maximizada, tomando paramétricamente la salida anual para riego y conservando fijo a través de todo el análisis el volumen reservado para el control de avenidas, en los meses que se considere necesario, que para este caso, se tomará para cada mes.

Se determina una función de producción para cada nivel de almacenamiento y para los dos productos del análisis: agua para riego y generación de energía eléctrica.

Se tiene entonces que la energía anual a ser satisfecha en cada período, es un patrón mensual prescrito por el número de horas de producción al mes:

$$EFA \leq \frac{EP_i}{HDP_i} \quad HDP_A \dots\dots\dots \text{para toda } i$$

donde:

EFA = Energía firme anual.

EP_i = Energía que puede ser producida en el mes i.

HDP_i = Número de horas disponibles para generación en el mes i.

HDP_A = Número de horas disponibles para generación en el año.

Puesto que una meta parcial para la operación óptima del embalse es la maximización del nivel de la energía firme anual (EFA) cuando la cantidad del agua firme anual es especificado, la función objetivo para esta meta parcial es:

$$\text{Máx EFA} = \text{máx} \left\{ \min_i \left[\frac{EP_i}{HDP_i} \quad HDP_A \right] \right\}$$

donde:

EFA = Energía firme anual.

i = Mes en el que el valor de la función es mínimo.

EP_i = Energía que puede ser producida en el mes i .

HDP_i = Número de horas disponibles para generación en el mes i .

HDP_A = Número de horas disponibles para generación en el año.

El objetivo de introducir la programación dinámica, es que se reduce un problema de n incógnitas en n problemas simples, comenzando en el estado A_i y mediante un proceso de una etapa, tomando una sola decisión, se llega al estado A_{i+1} .

Una de las características de la programación dinámica, es que resuelve el problema de atrás hacia adelante, ésto es, que evaluada la variable de estado al final del

proceso $f_n (A_n)$ siendo un almacenamiento óptimo, se toma una decisión de extracción S_n y se observa si la solución es óptima, al evaluar la variable de estado $f_{n-1} (A_{n-1})$, en caso contrario, se elige otra decisión de extracción y se evalúa la variable de estado hasta encontrar la óptima. Una vez alcanzada la máxima $f_{n-1} (A_{n-1})$, ésta se convierte en el final del proceso, y se repite la operación. Para cada una de las posibles decisiones se escoge el máximo valor, que nos determina la decisión óptima (S_i) para la etapa en estudio.

Así resulta que la función objetivo queda expresada por:

$$f_i (A_i) = \text{Máx}_{S_i} \left\{ \text{mín} \left[\frac{EP_i}{HDP_i} \text{ HDPA} \text{ ó } f_{i+1} (A_{i+1}) \right] \right\}$$

dónde:

$f_i (A_i)$ = Función de evaluación de la variable de estado en el mes i .

S_i = Extracción en el mes i .

EP_i = Energía que puede ser producida en el mes i .

HDP_i = Número de horas disponibles para generación en el mes i .

HDPA = Número de horas disponibles para generación en el año.

$f_{i+1} (A_{i+1})$ = Función de evaluación de la variable de estado en el mes $i+1$

Esta expresión, representa la ecuación recursiva que puede ser resuelta hacia atrás en el tiempo de acuerdo a los métodos normales de la programación dinámica, esto es, la funcional $f_n(A_n)$ es evaluada únicamente en valores de almacenamiento factibles A_i en cada período, donde la maximización se calcula en forma discreta sobre todas las salidas S_i .

Ahora, si conocemos la manera de determinar políticas óptimas para las $(n-1)$ etapas restantes del proceso, usamos el principio de optimalidad para deducir políticas óptimas en el proceso de n etapas como sigue:

Supongamos que para cada estado inicial A_1 en el proceso de $i-1$ etapas alcanzables desde A_0 , conocemos las políticas óptimas $S_2(A_1), \dots, S_n(A_1)$; entonces, la realización óptima del proceso de n etapas empezando en el estado A_0 , puede ser determinado siguiendo los pasos:

- a) Intentar todas las posibles primeras decisiones S_1 , y para cada S_1 :
- b) Observar el estado A_1 , al que se llega.
- c) Usar una política óptima para las $n-1$ etapas restantes, llamándole $S_2(A_1) \dots S_i(A_1)$

- d) Calcular el valor de la función criterio para esa realización de las i etapas alcanzado por S_1 y sus correspondientes $S_2(A_1), \dots, S_n(A_i)$.
- e) Finalmente, escoger aquella S_1 (o una de ellas si hay más de una), que maximice los valores obtenidos de la función criterio.

Para estructuras en serie, la salida de un elemento está conectada a la entrada del siguiente sin haber retroalimentación. Las decisiones que se toman en un instante, no alteran los eventos anteriores, solo tienen influencia en los eventos posteriores.

Por lo tanto, para la maximización de la variable de estado se tomará la decisión regida por aquel valor que sea el máximo de los mínimos en la etapa, desechando las decisiones "no óptimas" y conociendo el valor del estado anterior, los mínimos están dados por:

1. La evaluación de la variable de estado, mediante la función criterio en la etapa i con la decisión S_n , y
2. El valor de la variable de estado en la etapa $i+1$, para garantizar que no afectemos las etapas posteriores.

Como se dijo al principio, el método de programación dinámica es directamente programable, al final del Capítulo IV se muestra el diagrama de bloques para el algoritmo de solución y el programa de computadora que implanta este algoritmo, que es usado en el ejemplo de aplicación.

IV. EJEMPLO DE APLICACION

IV. EJEMPLO DE APLICACION.

El modelo de Programación Dinámica descrito en los capítulos anteriores, se aplicó para encontrar la política óptima de operación para el proyecto Huites, localizado en el Río Fuerte al noroeste de la República Mexicana, a través del programa de computadora DYNAMO.

Para lograr la aplicación del programa, tendremos en cuenta que el escurrimiento medio anual del Río Fuerte, en la estación de Huites, es de 3,733 millones de m^3 , dato basado en los escurrimientos históricos registrados en el período 1942-1977; la capacidad útil del embalse es de 3,910 millones de m^3 y su capacidad muerta de 280 millones de m^3 .

El porcentaje de la demanda mensual para riego respecto de la total anual, y la capacidad de reserva para control de avenidas en cada mes, determinan los niveles de almacenamiento máximo mensual y las salidas mensuales obligadas. Para facilitar el cálculo se suponen variaciones mensuales fijas en la energía media anual y las

demandas de agua para todo el período.

En la Tabla 1, al final de este capítulo, se especifican las horas pico para la producción de energía firme y las tasas de evaporación en milímetros para cada mes; en la Tabla 2, se especifica el área de la superficie del vaso, la máxima capacidad de la planta de energía y la tasa de producción de energía para almacenamientos a cada 200 millones de m^3 .

Los incrementos a la variable de estado, dada por el almacenamiento en cada mes, fueron fijos de 200 millones de m^3 , ésto es, la función de evaluación $f_n (A_n)$, se calcula para 20 puntos entre la capacidad muerta y la máxima. La extracción del mes, o sea la variable de decisión S_n , se incrementó en cantidades fijas de 20 millones de m^3 . La máxima energía de pico para un nivel de riego firme, se obtuvo para un período de operación de 24 años, a partir de 1950.

Los resultados del modelo se muestran en la Fig. H, al final de este capítulo, la cual indica la máxima energía de pico que es posible obtener para diferentes niveles de agua firme para riego, también indica la energía secundaria promedio que es posible generar en el período analizado.

Estos resultados, permiten definir una política de operación del embalse en forma aislada, pero el proyecto Huites forma parte de un sistema más complejo, denominado Sistema Interconectado del Noroeste, que contempla la operación integral de múltiples embalses y área de riego. Sin embargo, los resultados del modelo serán útiles en la determinación de una política óptima de operación del sistema completo.

Al final de este capítulo, se encuentra el diagrama de bloques, una copia del programa fuente del programa de computadora, desarrollado para la Burroughs 6700 de la UNAM, y los resultados obtenidos; este programa ha sido elaborado de tal forma que cuenta con dos tipos generales de salidas:

PRIMERA.

La primera tiene dos opciones: ($ISSI = - 1$)*, el programa escribe mes a mes las tablas de almacenamiento inicial (ALMAC - 1), almacenamiento final (ALMAC - 2), energía total mensual acumulada (ETA), potencia y potencia acumulada. Una segunda opción ($ISSI = 0$), hace que el programa escriba las mismas tablas, excepto que solo imprime los 12 meses del primer año.

El análisis de estas tablas, nos da una idea de

* Ver descripción de tarjetas de entrada y variables de programa final de este capítulo.

cuánta energía se puede generar en un mes, cuánta agua se tuvo que sacar y a qué almacenamiento final se llega en el siguiente mes, dados el almacenamiento inicial, la entrada determinística de ese mes y la evaporación en ese mes. El programa puede ser modificado de tal forma que las entradas sean de tipo sintético, generadas con cierta distribución apegada a los registros históricos, de manera que sirva para obtener, a partir de las tablas, la funcional óptima que lleve al máximo aprovechamiento del sistema, siendo aquella funcional la política de operación de la presa.

De cualquier manera, cuando se trabaja con datos o registros históricos, se puede obtener el máximo aprovechamiento que se podría sacar a la corriente si se construye una presa con las magnitudes especificadas y la potencia instalada de diseño. Esto se logra con el segundo tipo de salida.

SEGUNDA.

Dando a ISSI el valor de 1, el programa comienza a interpolar linealmente los volúmenes extraídos de la presa cada mes, a partir de los valores de las tablas de salidas y almacenamientos finales (para cada mes y almacenamiento) guardados en la matriz SAMOPT. Al terminar la

interpolación imprime el nombre de la presa, el nivel de riego, las salidas mensuales óptimas de cada mes del período analizado, la energía hidroeléctrica generada total y de pico y finalmente escribe los almacenamientos al iniciar y al terminar la simulación, como puede verse al final de este capítulo, ya que fue la alternativa elegida.

El programa está dimensionado para correrse con 50 años de registros históricos o sintéticos y 50 valores para niveles de almacenamiento. Sin embargo, las variables MATRIX (N, M, 1 ó 2) están dimensionadas solamente para 35 y 20 valores discretos del almacenamiento; de la misma forma, SAMOPT (35, 13) y ANOS (35) en aquellos casos en los que no se trabaje con ISSI = 1, es decir que no requiera el cálculo de las salidas mensuales óptimas de la presa, se podrán hacer corridas hasta de 50 años de datos y 50 valores para niveles de almacenamiento. Para períodos más largos o valores de almacenamiento discretos que excedan las especificaciones anteriores, se recomienda modificar las declaraciones del COMMON y DIMENSION.

El grado de los polinomios escogidos para los ajustes de $A=f(c)$ y $E=f(c)$ para cálculos de las evaporaciones y la obtención de las curvas de energía y potencia respectivamente, deberá ser variado hasta obtener el mejor ajuste.

M E S	DISTRIBUCION MENSUAL DEL R I E G O	DISTRIBUCION MENSUAL DE ENERGIA FIRME	HORAS DE P I C O	TASA DE EVAPORACION mm/mes.	ALMACENAMIENTO RESERVADO PARA CONTROL DE AVENIDAS / 10^6 m^3
ENERO	0.932	0.0833	88	68.7	1.138
FEBRERO	0.1024	0.0833	88	121.3	1.138
MARZO	0.1202	0.0833	88	196.3	1.138
ABRIL	0.1147	0.0833	88	254.1	1.138
MAYO	0.1028	0.0833	88	328.6	1.138
JUNIO	0.0962	0.0833	88	290.0	1.138
JULIO	0.0716	0.0833	88	60.2	1.508
AGOSTO	0.0470	0.0833	88	22.6	1.508
SEPTIEMBRE	0.0420	0.0833	88	65.7	1.508
OCTUBRE	0.0709	0.0833	88	130.0	1.508
NOVIEMBRE	0.0676	0.0833	88	120.1	1.138
DICIEMBRE	0.0708	0.0833	88	70.8	1.138

TABLA 1. DATOS MENSUALES DE ESCURRIMIENTO
PARA EL PROYECTO HUITES.

ALMACENAMIENTO (10^6 m^3)	CARGA (M)	AREA (Ha)	CAPACIDAD DE LA PLANTA (M W)	TASA DE ENERGIA ($\text{M W H}/10^6 \text{ m}^3$)
40.7	200	1,081.34	0	94.4
60.6	400	1,851.61	0	140.5
73.8	600	2,484.86	247.5	171.0
82.3	800	3,014.07	291.2	190.6
87.6	1000	3,481.46	320.0	203.0
91.1	1200	3,899.07	339.2	211.0
93.7	1400	4,289.36	353.8	217.0
96.1	1600	4,665.81	367.5	222.6
98.7	1800	5,037.49	382.9	228.8
101.9	2000	5,409.67	401.7	236.2
105.7	2200	5,784.43	424.3	245.0
110.1	2400	6,161.21	450.0	255.0
114.7	2600	6,537.44	450.0	265.8
119.5	2800	6,909.12	450.0	276.9
124.1	3000	7,271.40	450.0	287.6
128.3	3200	7,619.20	450.0	297.2
131.6	3400	7,947.78	450.0	304.9
133.9	3600	8,253.37	450.0	310.2
135.0	3800	8,533.69	450.0	312.8
135.1	4000	8,788.63	450.0	313.0
135.2	4200	9,020.78	450.0	313.1
135.3	4400	9,236.05	450.0	313.2
135.4	4600	9,444.27	450.0	313.3
135.5	4800	9,659.76	450.0	313.4
135.6	5000	9,901.93	450.0	313.5

TABLA 2. AREA DEL ALMACENAMIENTO Y CAPACIDAD DE LA PLANTA DE ENERGIA COMO FUNCION DEL ALMACENAMIENTO PARA-EL PROYECTO HUITES.

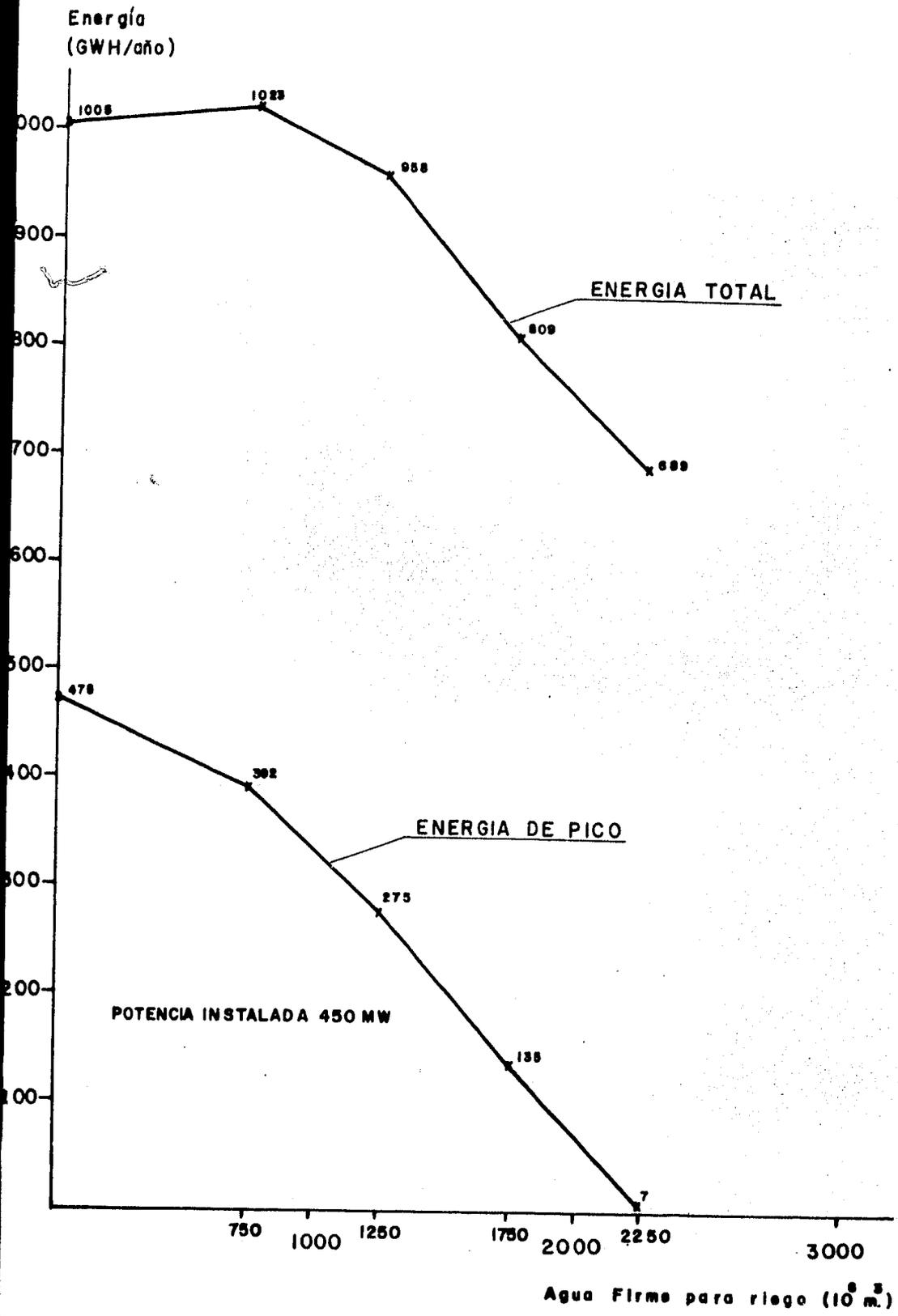


FIGURA H. ENERGIA DE PICO Y ENERGIA TOTAL EN FUNCION DEL RIEGO FIRME PARA EL PROYECTO HUITES.

DESCRIPCION DE TARJETAS DE ENTRADA

<u>TIPO:</u>	<u>FORMATO:</u>	<u>CONTENIDO:</u>
1	I5	GRADO
2	6E 12.8	(CALEE(I), I = 1, GRADO)
3	17A4	(MES (L), L = 1, 34, 3)
4	I5	NYEARS
5	12F6.2	(DMAN(K), K = 1, 12)
6	12F6.2	(REG(K), K = 1, 12)
7	12F6.0	(AMAX(K), K = 1, 12)
8	4(10X, F10.0)	RMIN, RMAX, DELS, DELD
9	12F6.0	(PKHRS(K), K = 1, 12)
10	12F6.0	(ALFA(J), J = 1, 12)
11	2F10.2	PCAD, ETA
12	12F6.6	(TH(J), J = 1, 12)
13	10F5.1	(EFN(L), L = 1, 20)
14	10F5.1	(CBL(L), L = 1, 20)
15	8X, 12F6.1	(EX(K), K = 1, 20)
16	8X, 12F6.1	(Q(J), J = 1, NMONT)
17	2I4	ANOI, ISSI
18	20A4	(PRESA(K), K = 1, 20)
Cuando ISSI = 1, lee:		
19	F6.1	ALMIS

DESCRIPCION DE PARAMETROS

GRADO	Grado del polinomio del ajuste Areas = f(Cap).
CALEE	Valores de los coeficientes de un polinomio de grado. (GRADO) para la curva áreas-capacidades.
MES	Título del mes.
NYEARS	Número de años de datos.
DMAN	Demanda obligatoria.
REG	Demanda de riego.
AMAX	Capacidad total menos capacidad de control de avenidas en cada mes.
RMIN	Capacidad mínima.
RMAX	Capacidad máxima.
DELS	Incremento del almacenamiento.
DELD	Incremento en la extracción.
PKHRS	Número de horas pico al mes.
ALFA	Coefficiente de horas del mes respecto al total anual.
PCAP	Potencia instalada.
ETA	Eficiencia de la planta.
TH	Número total de horas de generación.
EFN	Función de energía vs almacenamiento.
CBL	Función de potencia vs almacenamiento.
EX	Evaporaciones.

Q Volumen de entrada.

ANOI Año inicial - 1 de la simulación.

ISSI Índice de impresión.
 Si ISSI = - 1... impresión mensual.
 0... impresión anual.
 1... impresión de las salidas mensuales óptimas de la presa.

ALMIS Almacenamiento al inicio de la simulación.

PRESA Nombre de la presa.

XMA Valor discreto del almacenamiento.

OPREFN Función de estado óptimo.

OPREL Extracción óptima.

AE Energía secundaria.

ALMF Almacenamiento final.

DEA Energía total acumulada.

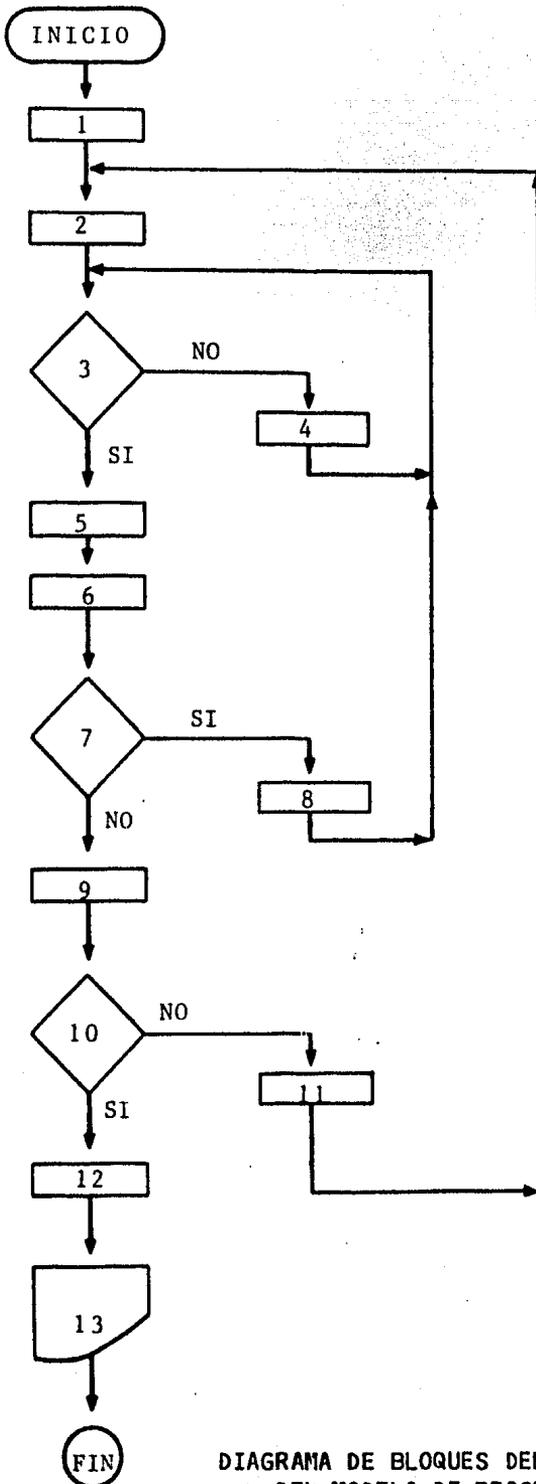
POT Potencia del mes.

MATRIX (M,M,1) Matriz que guarda la columna de las extracciones óptimas para cada mes y para cada incremento DELS del almacenamiento.

MATRIX (N,M,2) Matriz que guarda la columna de los almacenamientos finales a la que se llegaría si se extrajera MATRIX (N,M,1) para cada mes y para cada incremento DELS del almacenamiento.

SAMOPT Salida mensual óptima total interpolada de los valores correspondientes de DELS y las matrices arriba citadas.

QMED Salidas medias óptimas mensuales del período analizado.



1. Comienza en el último período de análisis
2. Selecciona un almacenamiento y extracción factibles y calcula la evaporación del mes.
3. ¿Se satisface la restricción de almacenamiento para el siguiente mes?
4. Selecciona una nueva extracción factible.
5. Calcula la energía generada.
6. Calcula el mínimo entre energía firme presente y futura.
7. ¿Existe alguna extracción o almacenamiento factible de ser - analizado?
8. Selecciona un nuevo almacenamiento o extracción.
9. Calcula la función de estado - para el mes.
10. ¿Se ha llegado al mes inicial?
11. Reduce en 1 el tiempo $n=n-1$.
12. Basado en la función de estado selecciona el nivel óptimo de energía firme.
13. Imprime la energía firme, secundaria, extracción, almacenamiento inicial y final.

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ALGORITMO DE SOLUCION DEL MODELO DE PROGRAMACION DINAMICA

D Y N / A M O
= = = = =

FILE 5=LEC,UNIT=READER

```

COMMON NMONTH, NYEARS, MES(34)
COMMON CALEE(11),GRADO
INTEGER GRADO
C READ(5,998) GRADO
GRADO=GRADO DEL POLINOMIO DEL AJUSTE DE LA CURVA DE AREAS-CAPACIDA DES
GRADO=GRADO+1
C READ(5,843) (CALEE(I),I=1,GRADO)
CALEE=VALORES DE LOS COEFICIENTES DE UN POLINOMIO DE GRADO (GRADO ) PARA
C LA CURVA DE AREAS-CAPACIDADES
C READ(5,999) (MES(L),L=1,34,3)
MES=TITULO DEL MES
C READ(5,998) NYEARS
NYEARS=NUMERO DE A+DS DE DATOS
C NMONTH = NYEARS * 12
CALL DYNAM
843 FORMAT(6E12.8)
999 FORMAT(17A4)
998 FORMAT(15)
END

```

```

C 0000001
FIB IS 0006 LONC
START OF SEGMENT 002
C 002:0000:0
C 002:0000:0
C 002:0000:0
C 002:0000:0
C 002:0008:2
C 002:0008:2
C 002:0008:2
C 002:000A:1
C 002:0017:2
C 002:0017:2
C 002:0017:2
C 012:0024:2
C 002:0024:2
C 002:002C:2
C 002:002C:2
C 002:002E:2
C 002:002F:0
C 002:002F:0
C 002:002F:0
C 002:002F:0
SEGMENT 002 IS 003B LONC

```

```

SUBROUTINE AVERAG
COMMON  I(600),DMAN(12),REG(12),EX(12)
COMMON  CALEE(11),GRADD
COMMON  N,J
COMMON  S1,S2
COMMON  AVE
INTEGER GRADD
A=0.0
00 23 M=1,GRADD
A = A + CALEE(M)*S1***(M-1)
23 CONTINUE
AEVAP = A * EX(J) / 100000.
150 B=0.0
00 24 M=1,GRADD
B = B + CALEE(M)*S2***(M-1)
24 CONTINUE
BEVAP = B * EX(J) / 100000.
AVE = (AEVAP + BEVAP)/2.0
RETURN
END

```

```

START OF SEGMENT 004
C 004:0000:0
C 004:0000:4
C 004:0002:0
C 004:0007:0
C 004:0009:4
C 004:000E:4
C 004:000F:2
C 004:0010:0
C 004:0015:0
C 004:0017:4
C 004:001C:4
C 004:001F:1
C 004:001F:4
SEGMENT 004 IS 0025 LONG

```



```

J=12
NMONTH = NYEARS * 12
DD 500 NN = 1,NMONTH
N = NMONTH - NN + 1
202 BEGSTO = DELS
KR=DMAN(J) / 20.0
IZ=0
REL = (KR + 1) * DELO
BAM = BEGSTO + Q(N) - REG(J) - RMIN
IF(BAM.LT.DMAN(J)) GO TO 198
203 IF(BEGSTO.GE.RMIN) GO TO 205
198 M = (BEGSTO+1.0)/DELS
OPREFN(M)=0.0
OPREL(M)=0.0
C OPREL=EXTRACCION OPTIMA
GO TO 498
205 IF(BEGSTO.GT.AMAX(J)+DELS) GO TO 198
M=(BEGSTO+1.0) / DELS
AFI = ENDSTO
ENDSTO = BEGSTO + Q(N) - REL - REG(J)
IF(ENDSTO.GT.AMAX(J)) GO TO 491
I=AVESTO
RAVSTO =AVESTO
RB=0
IF(ENDSTO.LT.RMIN.AND.IZ.EQ.1) GO TO 498
798 IF(ENDSTO.LT.RMIN.AND.IZ.EQ.0) GO TO 198
799 IZ=1
S1 = BEGSTO
S2 = ENDSTO
CALL AVERAG
ENDSTO = BEGSTO + Q(N) -REL - REG(J) - AVE
IF(ENDSTO.GT.AMAX(J)) GO TO 491
AVESTO=(BEGSTO+(Q(N)-REL-REG(J)-AVE)/2)/DELS
K = ENDSTO / DELS
A = K
L = AVESTO
B = L
FEN1 = REL * (EFN(L) + (AVESTO - B) * (EFN(L+1) - EFN(L)))
1 / ALFA(J)
FEMX = PKHRS(J) * (CBL(L) + (AVESTO -B) * (CBL(L+1) -
1CBL(L))) / ALFA(J)
IF(FEN1.LE.FEMX) GO TO 345
344 FEN1=FEMX
345 FEF=OPREFF(K) + (ENDSTO / DELS - A) * (OPREFF(K+1) -
1OPREFF(K))
IF(FEN1.GT.FEF) FEN1= FEF
IF(FEN1.EQ.0.0) GO TO 198
IF(FEN1+1.0.LT.FEN2) GO TO 498
OPREFN(N) = FEN1
OPREL(N) = REL
FEN2 = FEN1
497 INDI=1
IF(REL.GE.BAM) GO TO 498
ENSMX = REL * (EFN(L) + (AVESTO - B) * (EFN(L+1) - EFN(L)))
MXESC = PCAP * TH(J)
IF(ENSMX.GT.MXESC) GO TO 498
491 REL = REL + DELO
INDI=0
GO TO 203
498 NDE=PCAP * TH(J)
IF(INDI.NE.1) GO TO 704
703 RDE(N)=OPREL(N) * (EFN(L) + (AVESTO -B)*(EFN(L+1)-EFN(L)))
ALMF(N)=ENDSTO
C ALMF=ALMACENAMIENTO FINAL
GO TO 705
704 RDE(N)=OPREL(N) * (EFN(I) + (RAVSTO -RB)*(EFN(I+1)-EFN(I)))

```

-57-

```

006:00C8:2
006:00C9:5
006:00CE:5
006:00D0:0
006:00D2:4
006:00D4:0
006:00D7:0
006:00D7:4
006:00D9:5
006:00DF:3
006:00E2:0
006:00E3:5
006:00E6:1
006:00E7:4
006:00E9:3
006:00E9:3
006:00EA:0
006:00ED:5
006:00F0:1
006:00F1:0
006:00F6:1
006:00F8:4
006:00F9:4
006:00FA:3
006:00FB:2
006:00FE:0
006:0100:4
006:0101:2
006:0102:5
006:0104:2
006:0105:0
006:0108:1
006:010D:4
006:0113:2
006:0117:2
006:0117:5
006:0118:5
006:0119:2
006:011F:0
006:0121:4
006:0127:0
006:012B:3
006:012C:5
006:012D:4
006:0132:1
006:0134:3
006:0136:4
006:0137:5
006:0139:3
006:013B:3
006:013B:3
006:013D:2
006:013F:0
006:0140:2
006:0146:4
006:0149:4
006:014B:0
006:014C:3
006:014D:3
006:014E:0
006:0151:0
006:0152:1
006:0154:4
006:015C:2
006:015C:2
006:015C:5

```

```

705 ALMF(M)=AFI
    IF(RDE(M).GT.MDE) RDE(M)=MDE
    PDT(M)=RDE(M)/TH(J)
C   PDT=POTENCIA DEL MES
    KAES=(ALMF(M)/DELS)+0.49
    IF(OPREF(M).EQ.0.0) KAES=KAES+1
C   DEAC(M)=RDE(M) + ESACKAES
    DEAC(M)=RDE(M) + ESACKAES
    DEAC(M)=RDE(M) + ESACKAES
    PMS(M)=POT(M)+PAC(KAES)
    INDI=0
698 IF(BEGSTO.GE.RMAX) GO TO 499
    BEGSTO = BEGSTO + DELS
    FEN2 = 0.0
    GO TO 202
499 JA=J+2*(J-1)
    IF(ISSI) 1, 17, 821
14  NYCAR=NYP+ANDI
    WRITE(6,2010) MES(JA),NYEAR
    GO TO 821
17  IF(NYP.GT.1) GO TO 821
    WRITE(6,2010) MES(JA),NYP
821 CONTINUE
    DD 700 M=1, NDELS
    ESA(M)=DEAC(M)
    PAC(M)=PMS(M)
    IF(ISSI) 46, 45, 47
46  IF(OPREF(M).EQ.0) GO TO 700
    GO TO 5520
45  IF(OPREF(M).EQ.0.OR.NYP.GT.1) GO TO 700
    XMA=M*DELS
5520 WRITE(6,2000) XMA, OPREF(M), OPREL(M), RDE(M), ALMF(M), DEAC(M), POT(M),
    PMS(M)
    GO TO 700
47  MATRIX(N,M,1)=OPREL(M)
    MATRIX(N,M,2)=ALMF(M)
C   MATRIX(X,M,1)=MATRIZ QUE GUARDA LA COLUMNA DE LAS EXTRACCIONES OPT IMAS
C   PARA CADA MES
C   MATRIX(N,M,2)=MATRIZ QUE GUARDA LA COLUMNA DE LOS ALMACENAMIENTOS FINALES
    IF(NYP.EQ.1.AND.J.EQ.1.AND.M.EQ.NDELS) GO TO 90
    GO TO 700
90  NMES=NYEARS
    NMES=NMES*12
    READ(5,81) (PRESA(K),K=1,20)
C   PRESA=NOMBRE DE LA PRESA
    PRINT 26, (PRESA(K),K=1,20)
    SUMA=0.0
    DD 411 K=1, 12
    AMUS=DMAN(K)
411 SUMA=SUMA+AMUS
    RIEGO=SUMA
    PRINT 1111, RIEGO
    COMT=0
    XO=ALMIS
    DD 9520 M1=1, NMES
    M1=(XO/DELS)
    X1=M1*DELS
    X2=(M1+1)*DELS
    FX1=MATRIX(N,M1,1)
    FX2=MATRIX(N,M1+1,1)
    IF(FX1.NE.FX2) GO TO 5555
    FXO=FX1
    GO TO 16
5555 FXO=((X2-XO)*FX1+(XO-X1)*FX2)/(X2-X1)
    IF(COMT.EQ.1) GO TO 6666
56  NYEAR1=((M1-1)/12)+1
    MC=(M1-(NYEAR1*12))+12

```

```

C 006:0165:2
C 006:0167:0
C 006:0168:2
C 006:0170:0
C 006:0170:0
C 006:0174:5
C 006:0177:2
C 006:0177:2
C 006:0177:1
C 006:0177:4
C 006:0180:2
C 006:0182:1
C 006:0184:0
C 006:0184:4
C 006:0185:1
C 006:0188:3
C 006:0188:3
C 006:018A:3
C 006:018C:2
C 006:0195:5
C 006:0195:5
C 006:0197:0
C 006:01A0:2
C 006:01A0:2
C 006:01A1:0
C 006:01A3:2
C 006:01A5:4
C 006:01A8:0
C 006:01AA:1
C 006:01AA:4
C 006:01AD:4
C 006:01AF:3
C 006:01C1:4
C 006:01C6:2
C 006:01C6:5
C 006:01C8:4
C 006:01D0:1
C 006:01D0:1
C 006:01D0:1
C 006:01D3:4
C 006:01D4:1
C 006:01D5:1
C 006:01D6:1
C 006:01E3:2
C 006:01E3:2
C 006:01EF:2
C 006:01F0:0
C 006:01F1:0
C 006:01F2:5
C 006:01F6:2
C 006:01F7:2
C 006:01FE:2
C 006:01FF:0
C 006:01FF:5
C 006:0201:0
C 006:0203:0
C 006:0204:3
C 006:0206:4
C 006:0209:4
C 006:020C:2
C 006:020D:4
C 006:020E:3
C 006:020F:0
C 006:0213:2
C 006:0214:3
C 006:0216:4

```


* H U I T E S *

SALIDAS MENSUALES OPTIMAS DE LA PRESA
PARA UNA DEMANDA ANUAL DE RIEGO DE 5 MILLONES DE METROS CUBICOS



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1950	540.00	231.00	146.00	186.80	206.86	293.87	140.00	270.47	279.00	188.50	140.00	140.00	2762.50
1951	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	1680.00
1952	140.00	163.00	233.20	219.19	199.82	169.03	225.30	250.37	185.79	155.12	140.00	140.00	2220.83
1953	169.20	198.19	208.11	197.95	143.29	182.18	204.70	215.03	228.51	187.26	199.70	213.02	2347.14
1954	140.00	227.53	213.00	200.00	214.00	470.00	202.00	1211.00	160.00	155.80	227.10	217.03	3657.46
1955	322.07	244.00	232.00	214.00	218.00	212.00	408.00	554.00	154.00	278.00	140.00	140.00	3116.07
1956	140.00	151.20	184.72	183.82	192.28	140.20	141.60	273.82	228.35	140.00	140.00	140.00	2056.00
1957	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	158.60	229.84	140.00	154.56	140.00	140.00	140.00	2008.52
1958	257.89	287.59	300.00	226.00	234.00	198.90	448.00	998.00	300.00	149.00	313.70	266.30	3978.48
1959	238.00	219.00	222.00	236.00	201.00	429.00	188.00	1200.60	818.40	218.00	279.00	322.00	4571.00
1960	1406.00	837.00	248.00	234.00	205.00	413.00	206.00	803.00	181.00	273.00	246.00	169.00	5221.00
1961	179.80	314.20	244.00	222.00	204.00	512.00	364.00	797.00	310.40	191.60	181.00	291.00	3811.00
1962	183.00	291.00	245.00	142.00	185.20	194.44	160.00	251.95	193.82	241.59	188.00	217.50	2493.50
1963	235.25	248.25	214.00	203.00	213.00	430.00	166.00	1218.80	610.20	193.00	238.80	213.20	4203.50
1964	286.00	248.00	247.00	226.00	227.00	259.80	488.00	642.00	215.00	149.90	231.05	140.00	3368.95
1965	222.53	315.07	252.45	219.00	218.00	209.00	398.00	556.00	164.00	282.00	236.00	154.40	3226.45
1966	156.46	257.00	259.49	231.66	210.00	276.00	530.00	1855.00	912.00	212.10	172.45	199.38	5571.53
1967	214.03	225.04	227.00	203.00	218.00	544.00	696.00	1238.80	313.20	323.00	467.00	272.00	4941.07
1968	731.00	374.00	266.00	351.00	276.00	466.00	1160.00	1179.00	653.00	146.00	144.50	197.15	5943.65
1969	276.75	254.60	145.40	189.44	208.05	211.33	248.39	140.56	206.27	140.00	211.78	175.36	2407.92
1970	290.74	246.69	307.00	245.00	209.00	217.00	442.00	452.00	317.30	142.16	178.12	209.21	3256.22
1971	229.60	216.24	198.01	213.35	210.00	548.00	440.00	1221.50	923.50	195.00	280.00	177.00	4852.21
1972	295.00	244.00	223.00	212.00	239.00	246.00	740.00	1114.40	1294.72	833.76	618.24	389.76	6449.88
1973	552.24	1010.88	239.60	345.40	241.00	472.00	272.00	1199.10	950.90	293.00	225.00	404.00	6205.12

SALIDAS MEDIAS OPTIMAS

311.90	295.15	223.96	215.86	206.35	320.86	359.91	746.77	412.25	223.66	230.71	217.22	3764.58
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---------

EPICD = 470.88 GWH/ANO

ETOTAL = 1004.82 GWH/ANO

ALMIS = 3000.00 MM3

ALMFS = 2213.00 MM3

* H U I T E S *

SALIDAS MENSUALES OPTIMAS DE LA PRESA
 PARA UNA DEMANDA ANUAL DE RIEGO DE 1250 HILLONES DE METROS CUBICOS.



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1950	1260.00	100.00	100.00	100.00	150.00	116.80	135.04	80.00	252.94	156.97	103.17	81.61	2636.54
1951	1260.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	2360.00
1952	1260.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	2480.00
1953	1260.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	106.05	100.00	100.00	100.00	100.00	2486.05
1954	1260.00	120.00	124.84	134.36	140.00	140.00	140.00	120.00	103.38	100.00	100.00	100.00	2502.58
1955	1260.00	101.12	189.36	193.54	208.32	212.00	174.00	188.00	154.00	278.00	120.40	104.72	3183.95
1956	1260.00	116.29	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	2476.29
1957	1260.00	120.00	126.00	120.00	120.00	125.66	134.39	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	2600.05
1958	1260.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	160.00	160.00	140.00	120.00	120.00	120.00	2780.00
1959	1260.00	238.54	222.00	236.00	201.00	171.70	442.60	1439.79	381.91	218.00	279.00	462.00	5552.54
1960	1260.00	816.24	248.00	234.00	235.00	213.00	193.00	216.00	161.00	128.00	222.68	159.48	4083.08
1961	1260.00	431.92	244.00	222.00	204.00	236.80	237.29	179.80	127.20	194.00	301.00	147.30	3785.22
1962	1260.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	134.43	128.51	185.26	125.95	120.00	2794.15
1963	1260.00	140.00	148.22	168.60	187.95	278.54	494.88	708.37	165.00	123.20	166.27	259.35	4031.07
1964	1260.00	204.74	225.87	216.75	222.12	269.00	274.00	256.00	135.00	165.58	124.65	120.00	3473.63
1965	1260.00	140.00	140.00	140.00	140.00	142.74	168.21	140.00	142.78	120.00	174.58	120.00	2828.29
1966	1260.00	332.56	269.00	232.00	210.00	503.40	615.20	1242.40	912.70	202.40	134.92	120.00	6033.88
1967	1260.00	140.00	140.00	171.14	180.51	280.63	866.81	898.60	268.00	323.00	267.00	266.00	3061.68
1968	1320.00	222.00	435.00	351.00	276.00	266.00	1360.00	525.00	287.00	194.20	180.12	159.84	5496.16
1969	1260.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	2700.00
1970	1260.00	140.00	140.00	175.42	188.88	194.51	216.71	237.66	234.66	212.70	138.66	121.53	3260.73
1971	1260.00	140.00	140.00	160.00	160.00	160.00	160.00	1197.29	379.82	195.00	200.00	207.90	4360.01
1972	1260.00	140.00	160.00	172.62	192.84	215.85	673.56	1140.97	1292.73	851.03	290.48	214.00	6604.10
1973	1260.00	798.00	239.60	345.40	241.00	472.00	272.00	1199.10	950.90	293.00	225.00	404.00	6700.00

SALIDAS MEDIAS OPTIMAS

1263.62	216.72	173.60	177.20	171.15	200.36	310.73	446.23	282.37	195.87	163.07	163.66	3764.58
---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---------

EPICO = 275.25 GWH/ANO

ETOTAL = 958.33 GWH/ANO

ALMIS = 3000.00 MM3

ALMFIS = 2213.00 MM3

* H U I T E S *

SALIDAS MENSUALES OPTIMAS DE LA PRESA
PARA UNA DEMANDA ANUAL DE RIEGO DE 1750 MILLONES DE METROS CUBICOS



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1950	1760.00	60.00	60.00	60.00	60.00	33.40	107.44	56.42	133.37	50.37	89.00	57.20	2577.20
1951	1760.00	60.00	60.00	60.00	60.00	30.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	2414.78
1952	1760.00	60.00	60.00	60.00	60.00	51.70	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	2421.70
1953	1760.00	62.43	60.00	73.79	67.71	30.00	60.00	60.00	60.00	60.00	59.14	56.32	2457.59
1954	1760.00	72.67	60.00	80.00	80.00	90.89	80.00	80.00	60.00	60.00	60.00	60.00	2563.57
1955	1760.00	80.00	30.00	155.09	192.84	207.23	174.00	188.00	154.00	78.00	100.80	77.28	3247.24
1956	1760.00	70.99	67.39	80.00	75.75	69.78	77.20	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	2501.12
1957	1760.00	72.18	30.00	80.00	91.76	74.49	80.00	70.24	73.21	61.69	69.52	71.74	2574.34
1958	1760.00	117.98	111.60	110.48	115.18	139.49	140.00	140.00	120.00	100.00	100.00	100.00	3054.73
1959	1760.00	173.37	195.95	211.97	196.69	421.27	228.00	1567.40	411.60	218.00	279.00	140.90	5804.14
1960	1760.00	264.10	125.60	188.20	191.96	160.00	160.17	161.23	142.85	100.00	211.29	139.34	3584.74
1961	1760.00	166.22	233.48	219.66	232.59	312.00	142.00	199.00	125.00	194.00	101.00	136.40	3793.76
1962	1760.00	120.00	120.00	120.00	120.00	140.00	120.00	120.00	120.00	100.00	100.00	100.00	3040.00
1963	1760.00	140.00	174.24	180.31	190.12	214.77	159.52	262.65	155.00	173.00	257.00	115.00	3791.60
1964	1760.00	120.00	123.90	131.69	140.00	130.45	236.58	240.39	135.00	154.60	111.43	100.00	3434.08
1965	1760.00	130.81	130.59	137.75	140.00	140.00	149.96	140.00	139.96	107.81	175.02	102.70	3254.50
1966	1760.00	259.23	250.10	232.00	210.00	336.00	770.00	1135.00	232.00	192.70	125.29	109.01	5621.32
1967	1760.00	236.00	227.00	203.00	218.00	304.00	938.00	484.00	125.40	134.46	216.00	251.00	3095.86
1968	1760.00	394.23	318.36	151.00	276.00	226.00	1200.00	125.00	107.00	146.00	115.00	155.80	5474.94
1969	1760.00	120.00	120.00	120.00	140.00	140.00	120.00	120.00	100.00	100.00	100.00	100.00	3040.00
1970	1760.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	120.00	100.00	100.00	100.00	3160.00
1971	1760.00	140.00	140.00	140.00	150.00	150.00	160.00	725.20	150.00	195.00	200.00	197.60	4127.90
1972	1760.00	140.00	160.00	160.00	160.00	150.00	160.00	1241.12	1285.22	588.36	186.00	214.00	6214.40
1973	1760.00	697.80	239.68	345.52	241.00	472.00	272.00	1199.10	750.90	293.00	225.00	404.00	7100.00

SALIDAS MEDIAS OPTIMAS

1760.00 183.17 140.35 143.33 146.65 181.39 241.37 359.78 212.27 140.90 131.69 123.69 3764.58

EPICD = 135.16 GWH/ANO

ETOTAL = 809.11 GWH/ANO

ALMIS = 3000.00 MM3

ALMFIS = 2213.00 MM3

* F U I T E S *

SALIDAS PERSUALES OPTIMAS DE LA PRESA
 PARA UNA DEMANDA ANUAL DE HIECO DE 2750 MILLONES DE METROS CUBICOS



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1950	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1951	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1952	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1953	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1954	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1955	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1956	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1957	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1958	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1959	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1960	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1961	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1962	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1963	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1964	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1965	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1966	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1967	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1968	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1969	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1970	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1971	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1972	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1973	0.00	0.00	0.00	141.00	141.00	150.00	160.00	323.20	959.80	293.00	225.40	404.00	2007.00

SALIDAS MEDIAS OPTIMAS

0.00	0.00	0.00	5.88	5.88	6.67	6.67	13.47	39.99	12.21	9.38	16.83	116.96
------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	------	-------	--------

EFICC = 0.00 GWH/ANC

ETICIAI = 49.21 GWH/ANC

ALMIS = 3000.00 MM3

ALMFIS = 2213.00 MM3

V. CONCLUSIONES

V. CONCLUSIONES.

Desde tiempos muy remotos, el Hombre ha dejado huellas de su paso por la Tierra, las que a través del tiempo se han transformado en experiencia para las generaciones actuales. Esto ha permitido que se desarrolle cada día más, mejorando las técnicas aplicadas por sus antecesores.

Una de las preocupaciones fundamentales ha sido la de contar con los beneficios del agua, resolviendo los problemas que involucran su captación, conducción, almacenamiento y distribución, con el fin de tener reservas y aprovecharlas de una forma más eficiente.

El presente trabajo ofrece un método para el manejo racional del almacenamiento y distribución del agua, reduciendo los problemas que representan tanto la escasez como el excedente de ésta, además, para lograr la máxima producción de energía eléctrica que permita la capacidad instalada de la planta, aunada a la necesidad de agua en los distritos de riego que dependen de dicho almacenamiento.

En el planteamiento general del problema están involucradas varias disciplinas, como son: la Hidrología en la determinación de la ley de entradas de agua al almacenamiento en función de las características de la cuenca, así como en datos históricos de escurrimientos, los que no siempre son suficientes para una definición confiable de la ley de entradas; la Estadística apoyando a la primera en la generación de datos sintéticos de escurrimientos, los que servirán para la determinación de la ley de entradas; la Topografía, la Geología y la Climatología intervienen en la definición del volumen de agua que es capaz de almacenar el embalse, la cantidad de agua que se pierde por evaporación y por infiltración, variables importantes en la determinación de la ley de salidas de agua. Todas estas son variables que intervienen en la ecuación de continuidad, la que sirve de base para determinar la cantidad de agua de la que se puede disponer en el proceso de Hidrogeneración, que depende principalmente de la capacidad instalada de la planta y de la ley de demandas a que esté sujeto el embalse.

En la solución del problema, se busca que los beneficios obtenidos del almacenamiento de agua sean óptimos, determinando el volumen de agua que se deberá dejar salir, y el momento para hacerlo, combinando de manera eficiente las horas de demanda de energía eléctrica con las demandas de agua para riego, evitando que el volumen de agua

almacenado se reduzca más allá del mínimo necesario para el abastecimiento, o bien que aumente de manera tal que la capacidad de reserva para el control de avenidas se reduzca, además es conveniente que la planta de hidrogenación trabaje dentro de su rango de eficiencia, lo que depende principalmente de la carga de agua.

La solución del problema se complica al hacer intervenir las variables que se han mencionado, y aún más si se toma en cuenta que una presa de almacenamiento de propósitos múltiples se puede destinar a otros fines, como son la demanda de agua potable o la creación y desarrollo de centros turísticos y recreativos. Para resolver el problema, en el presente trabajo se aplica el método de optimización conocido como Programación Dinámica, que de acuerdo al Principio de Optimalidad de Bellman, permite resolver un problema con muchas incógnitas como muchos problemas de una sola incógnita, haciendo que su solución sea lo más sencilla posible; resuelve el problema por etapas, empezando en el estado final óptimo y analizando las posibles extracciones para encontrar el estado inicial de la etapa eligiendo la extracción óptima antes de pasar a la siguiente etapa, reiterando el cálculo para cada una de ellas, razón por la cual se aplica fácilmente en computadora, cambiando gran cantidad de horas hombre en unos cuantos minutos de tiempo máquina.

El programa de computadora (DYNAMO) desarrollado en este trabajo, permite encontrar la operación óptima en una presa de almacenamiento de propósitos múltiples, combinando únicamente energía firme, energía secundaria y agua para riego, tomando en cuenta el control de avenidas mediante un volumen de reserva en cada mes, el que se conserva fijo a través de todo el análisis. Sin embargo, se puede introducir mediante pequeñas modificaciones al programa, los cálculos que se requieran para los demás propósitos del embalse.

Este programa cuenta con dos tipos de impresión de resultados, uno muy general que escribe mes a mes las tablas de almacenamiento inicial y final, la energía total mensual acumulada, potencia y potencia acumulada; el segundo tipo, que es el que se presenta en este trabajo, el programa imprime el volumen de riego, las salidas mensuales óptimas de cada mes del período analizado, la energía hidroeléctrica generada total y de pico, y finalmente escribe los almacenamientos al iniciar y terminar la simulación, como puede verse al final del capítulo de ejemplo de aplicación. Se eligió la presa Huites, ubicada en el Río Fuerte por ser un elemento importante del Sistema Interconectado del Noroeste del País y aprovechando la disponibilidad de datos de escurrimientos históricos, desde 1942, y obteniendo resultados para un período de 24 años, a partir de 1950, utilizando para ello la computadora BURROUGS de la

UNAM.

Se analizaron seis alternativas, variando únicamente la demanda anual de riego de 0 a 2,750 millones de metros cúbicos y se consideró en los seis casos el almacenamiento inicial de 3,000 millones de metros cúbicos.

En la Figura H se presenta la gráfica que describe el comportamiento de la energía que puede producirse según la cantidad de agua comprometida para riego, observando que mientras ésta sea mayor, será menor la energía generada tanto de pico como secundaria.

Así, este trabajo recopila parte de la experiencia del Hombre en la búsqueda de los beneficios que ofrece un recurso natural como es el agua, aplicando técnicas modernas de solución de problemas como lo es la Programación Dinámica, y utilizando las herramientas poderosas con las que cuenta el Hombre de hoy en día, como es la computadora, para lograr diseños más racionales que involucran mejores aprovechamientos a menores costos.

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

BELLMAN, R. "Dynamic Programming"; Princeton Univ.; 1957.

CARDENAS, M. ANGEL. The Systems Approach to Investment Planning in the Electrical Industry. Tesis Doctoral. University of California; Los Angeles, Calif.; 1971.

GEREZ, VICTOR. - GRIJALVA, MANUEL. "El Enfoque de Sistemas". Editorial Linusa; México, 1978.

GUITRON DE LOS REYES, ALBERTO. - FERNANDEZ GARCIA, LEOPOLDO. "Modelo Hidroeléctrico para la operación óptima de un Proyecto de Propósitos Múltiples". IV Congreso Nacional de Hidráulica; México; Noviembre, 1978.

GUITRON DE LOS REYES, ALBERTO. - ROEFS, THEODORE G. "Modelos Estocásticos de Embalses: Esfuerzo Relativo de Computación". Recursos Hidráulicos; Vol. IV; Nº 4; México, 1975; pp. 606-613.

GUITRON DE LOS REYES, ALBERTO. "Memoria del Programa DYNAMO".

GUITRON DE LOS REYES, ALBERTO. "Generación de Energía Hidroeléctrica".

HALL, WARREN A. y BURAS, N. "The Dynamic Programming Approach to Water-Resources Development"; Journal of Geophysical Research; Vol. 66; Nº 2; Febrero de 1961; pp.517-520.

HARBOE, RICARDO E. y otros. "Optimal Policy for Operation of a Single Multipurpose Reservoir"; ASCE Journal of the Hydraulics Division; Noviembre de 1970.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS. Manual de Diseño de Obras Civiles. Hidrotecnia. A.2.4 Máquinas Hidráulicas; CFE; México, 1982.

PERDOMO E., DOMINGO A. y PASCAL, JOSE. "Método Iterativo para Optimizar un Proyecto Hidroeléctrico". Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación; Panamá, Rep. de Panamá.

SANCHEZ PRIETO, CARLOS. "Estudio para el Abastecimiento de Energía Eléctrica para el Desarrollo Laguna del Tepache"

_____, BUTCHER, WILLIAM S. y ESGBUE, AUSTIN. "Optimization or the Operation of a Multi-Purpose Reservoir by Dynamic Programming". Water Resources Research; Vol. 4, Nº 3; Junio de 1968; pp. 471-477.

_____, TAUXE, G. W. y YEH, W. "An Alternate procedure for the Optimization of Operations for Planning with Multiple River, Multiple Purpose Systems". Water Resources Research; Dic. 1969.