



175  
29

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

***“OPERACION OPTIMA DE SISTEMAS DE PLANTAS  
HIDROELECTRICAS CON PROGRAMACION DINAMICA  
DETERMINISTA”***

**MARCELO ANTONIO VOLPI FUNKE**

**MEXICO**

**1987**



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.

## INDICE.

I.	INTRODUCCION.	1
II.	OPERACION OPTIMA DE SISTEMAS DE PLANTAS HIDROELECTRICAS.	
II.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE OPTIMACION PARA SISTEMAS DE PLANTAS HIDROELECTRICAS.	3
II.2	LA PROGRAMACION DINAMICA DETERMINISTA APLICADA A LA OPERACION OPTIMA DE SISTEMAS DE PLANTAS HIDROELECTRICAS.	
II.2.1	La programación dinámica determinista.	8
II.2.2	Método de solución propuesto.	13
III.	APLICACIONES.	
III.1	EL INFIERNILLO.	
III.1.1	Descripción del sistema El Infiernillo.	18
III.1.2	Descripción del programa.	19
III.1.3	Comentarios al programa.	27
III.1.4	Resultados.	31
III.1.5	Comparación de resultados con una política obtenida mediante la programación dinámica estocástica.	37
III.1.6	Comparación de resultados con la operación real del sistema.	40
III.2	SISTEMA LA ANGOSTURA - MALPASO.	
III.2.1	Descripción del sistema La Angostura - Malpaso.	42
III.2.2	Descripción del programa.	43
III.2.3	Resultados.	53
III.2.4	Comparación de resultados con la operación real del sistema.	60
III.2.5	Comparación con una política obtenida con programación dinámica estocástica.	64

<b>IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO 1</b>	
<b>1.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA INFIERNILLO.</b>	<b>69</b>
<b>1.2 LISTADO DEL PROGRAMA INFIERNILLO.</b>	<b>70</b>
<b>1.3 MANUAL DEL USUARIO DEL PROGRAMA INFIERNILLO.</b>	<b>75</b>
<b>1.4 LISTADO DEL PROGRAMA PARA INTRODUCIR EL ARCHIVO DE ENTRADAS PARA INFIERNILLO.</b>	<b>76</b>
<b>1.5 LISTADO DE GASTOS DE ENTRADA.</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO 2</b>	
<b>2.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA ANG_MAL (SISTEMA LA ANGOSTURA - MALPASO).</b>	<b>78</b>
<b>2.2 LISTADO DEL PROGRAMA ANG_MAL.</b>	<b>80</b>
<b>2.3 MANUAL DEL USUARIO PARA ANG_MAL.</b>	<b>86</b>
<b>2.4 LISTADO DEL PROGRAMA PARA INTRODUCIR EL ARCHIVO DE ENTRADAS AL SISTEMA.</b>	<b>87</b>
<b>2.5 LISTADO DE GASTOS DE ENTRADA Y EVAPORACIONES PARA EL SISTEMA LA ANGOSTURA - MALPASO.</b>	<b>88</b>
<b>Apéndice 1.</b>	<b>92</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.</b>	<b>93</b>

## I. INTRODUCCION

La optimación de la operación de sistemas de plantas hidroeléctricas interconectadas hidráulicamente es un problema actual que necesita de grandes máquinas computadoras y algoritmos de cómputo relativamente complejos.

Establecer políticas óptimas de operación para estos sistemas significa producir una mayor cantidad de energía eléctrica sin necesidad de invertir en infraestructura.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un algoritmo computacional basado en la programación dinámica determinista para optimar un sistema de  $n$  presas.

Se escogió la programación dinámica determinista porque es un método relativamente sencillo de programar, además de ocupar menos capacidad de memoria para un problema determinado que otros métodos de optimación.

Esto es de vital importancia si se quiere modelar un sistema muy grande como el sistema eléctrico nacional interconectado, cuyo modelo resulta prácticamente imposible de manejar mediante el uso de la programación dinámica estocástica.

Mediante el uso de este método se pretende llegar a determinar la política óptima de operación para un sistema de dos presas, además de observar sus variaciones con respecto al uso de otros métodos de optimación (programación dinámica estocástica) y comparar resultados con respecto a la operación real del sistema.

El problema de la autocorrelación de entradas mensuales al sistema se mejora de manera implícita ya que se trabaja con datos reales de entrada y una secuencia real.

En el capítulo II se plantea el problema de optimación de manera general para sistemas de plantas hidroeléctricas. Posteriormente se propone un método general basado en la programación dinámica determinista.

En el capítulo III se describen los algoritmos computacionales diseñados para optimar sistemas reales. Se presenta la aplicación a la presa El Infiernillo y al sistema La Angostura-Malpasso.

Además se integran diversos anexos, los cuales contienen los programas codificados en TURBO-PASCAL para ser ejecutados en microcomputadoras P.C..

## II. OPERACION OPTIMA DE SISTEMAS DE PLANTAS HIDROELECTRICAS.

### II.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE OPTIMACION PARA SISTEMAS DE PLANTAS HIDROELECTRICAS.

Sea un sistema de  $m$  plantas hidroeléctricas interconectadas hidráulicamente como por ejemplo el mostrado en la figura II.1.1, para el caso  $m=7$ . En el caso general, la ecuación de continuidad para el sistema completo se puede escribir como:

$$\bar{X} + [T] (\bar{R} + \bar{D}) - \bar{W} - \Delta\bar{V} = 0 \quad (\text{II.1.1})$$

En la ecuación II.1.1:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}; \quad \bar{R} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix}; \quad \bar{D} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix}; \quad \bar{W} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix}; \quad \Delta\bar{V} = \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}$$

donde (ver también la figura II.1.2):

$X_j$  = Volumen de entrada por cuenca propia a la presa  $j$  durante un intervalo de tiempo  $dt$  dado.

$R_j$  = Volumen turbinado en la planta  $j$  en el mismo  $dt$ .

$D_j$  = Volumen derramado por el vertedor de excedencias de la planta  $j$  en el  $dt$ .

$W_j$  = Volumen perdido de la presa  $j$  por evaporación, infiltración, extracciones no turbinadas, etc... en el  $dt$ .

$\Delta V_j$  = Cambio de volumen almacenado en la presa  $j$  durante el intervalo  $dt$ .

$[T]$  es una matriz de transferencia, que depende de la ubicación relativa de las presas. Por ejemplo, en el caso particular mostrado en la figura II.1.1,  $[T]$  es

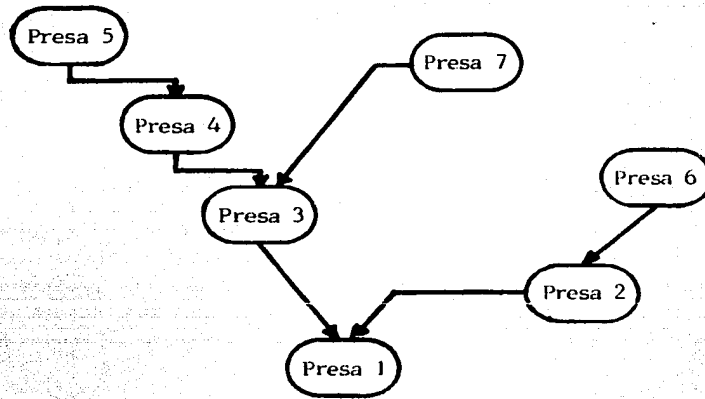


fig II.1.1

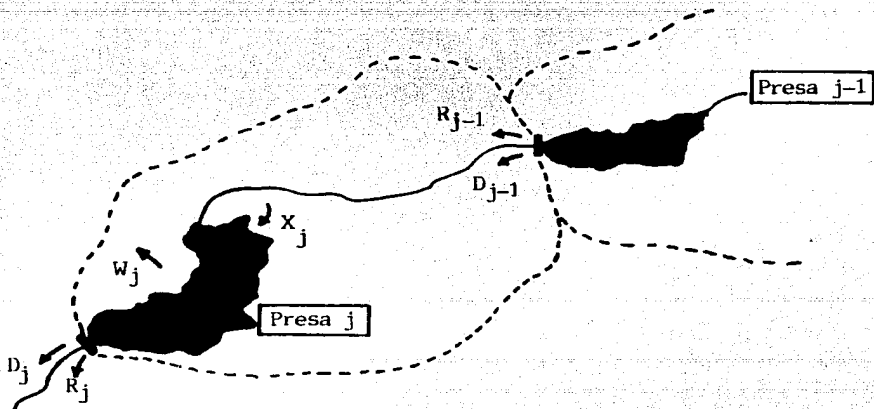


fig II.1.2



$$[T] = \begin{bmatrix} -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & +1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Por otro lado, la generación de energía durante un intervalo  $dt$  en la planta hidroeléctrica  $j$  es

$$G_j = K_j R_j H_j \quad (\text{II.1.2})$$

donde  $K_j$  es una constante para cada planta y  $H_j$  es la carga neta media sobre las turbinas de la planta  $j$  durante el intervalo  $dt$  considerado.

$H_j$  se relaciona con el volumen medio almacenado en la presa  $j$  durante el intervalo  $dt$ , mediante la curva elevación - volumen del vaso  $j$ :

$$H_j = f_j (V_j) \quad (\text{II.1.3})$$

por lo que la ecuación II.1.2 se puede escribir de la siguiente forma:

$$G_j = K_j R_j f_j (V_j) \quad (\text{II.1.4})$$

El beneficio obtenido por generar  $G_j$  kWh en la presa  $j$  durante el  $dt$  es

$$b_j = g_j (G_j) \quad (\text{II.1.5})$$

donde  $g_j$  es alguna función. En México,  $g_j(G_j)$  está compuesta usualmente por varias líneas rectas, como se muestra en la figura III.1.3, según referencia 2.

El volumen derramado  $D_j$  puede producir daños por inundaciones aguas abajo de la presa  $j$ ; el costo de dichos daños es

$$d_j = h_j (D_j) \quad (\text{II.1.6})$$

donde  $d_j$  es el daño producido por el derrame  $D_j$  en pesos y  $h_j$  es una función que depende del valor de los bienes que resultarían afectados por dicho derrame y de las obras de protección contra inundaciones que se construyan aguas abajo de la presa  $j$ . En la figura III.1.2 se ha reproducido la función II.1.6 para el caso de la presa El Infiernillo (ver referencia 2). Nótese que se tiene una curva diferente para cada obra de protección contra inundaciones que se construya en el delta del río Balsas.

Por lo tanto, el beneficio neto obtenido durante el  $dt$  considerado en la presa  $j$  es

$$B_j = g_j (G_j) - h_j (D_j) \quad (\text{II.1.7})$$

y el beneficio neto obtenido durante el  $dt$  en el sistema completo es

$$B = \sum_{j=1}^n B_j = \sum_{j=1}^n [g_j (G_j) - h_j (D_j)] \quad (\text{II.1.8})$$

$B$  es, naturalmente, una función del tiempo.

Entonces, el beneficio neto obtenido durante un intervalo finito  $T$  será

$$\beta = \int_0^T B dt = \sum_{j=1}^n \int_0^T [g_j (G_j) - h_j (D_j)] dt \quad (\text{II.1.9})$$

El problema consiste entonces en maximizar  $\beta$ . Formalmente, el planteamiento del problema puede hacerse de diversas maneras, básicamente dependiendo del tipo de algoritmo de optimización por usar.

Una de esas maneras de hacer dicho planteamiento es (ver ecuaciones II.1.1 a la II.1.9).

$$\max_{R_j(t)} \beta = \sum_{j=1}^n \int_0^T [g_j (G_j) - h_j (D_j)] dt \quad (\text{II.1.10a})$$

$$\text{s.a.} \quad \bar{X} + [T] (\bar{R} + \bar{D}) - \bar{W} - \Delta \bar{V} = 0 \quad (\text{II.1.10b})$$

$$G_j = K_j R_j f_j (v_j) \quad \forall j \quad (\text{II.1.10c})$$

$$W_j = \phi_j (t) \quad \forall j \quad (\text{II.1.10d})$$

$$D_j = \psi_j (v_j) \quad \forall j \quad (\text{II.1.10e})$$

donde  $\phi_j(t)$  es una función del tiempo, conocida, y  $\psi_j$  es otra función, también conocida, que depende de las características del vertedor de la presa  $j$ .

Adicionalmente, se tienen las condiciones

$$0 \leq R_j \leq R_{\max_j} \quad (\text{II.1.10f})$$

$$V_{\min_j} \leq V_j \leq V_{\max_j} \quad (\text{II.1.10g})$$

La primera impuesta por la capacidad de las turbinas de la planta  $j$  y la segunda por la ubicación del umbral de la obra de toma por un lado y por la elevación de la corona de la cortina de la presa  $j$  por el otro.

Es conveniente hacer las siguientes observaciones con respecto al problema planteado por las ecuaciones (II.1.10a) a (II.1.10g):

- a) Las funciones  $f_j(V_j)$  (curva elevaciones - volúmenes de la presa  $j$ ) y  $\psi_j(V_j)$  (curva de gastos del vertedor) son no lineales.
- b) Las funciones  $g_j(G_j)$  y  $h_j(D_j)$ , de beneficio obtenido por generación y daños causados por derrames respectivamente, son también, en general, no lineales, aunque en algunos casos prácticos puedan representarse como funciones lineales por partes.
- c) La entrada por cuenca propia a cada presa,  $X_j$ , es una variable aleatoria, con una función de distribución no gaussiana en términos generales, (ver referencia 2).

## II.2 LA PROGRAMACION DINAMICA DETERMINISTA APLICADA A LA OPERACION OPTIMA DE SISTEMAS DE PLANTAS HIDROELECTRICAS.

### II.2.1 La programación dinámica determinista.

La operación de un sistema de presas se puede presentar como un modelo dinámico, donde el comportamiento del sistema cambia con el tiempo. En términos matemáticos el modelo está formado por ecuaciones diferenciales que tratan de representar las condiciones y/o restricciones del sistema y por una función objetivo que depende de los parámetros del sistema, las variables de decisión y el tiempo. Las ecuaciones II.1.10a a la II.1.10g son un ejemplo del modelo.

El cálculo de variaciones y la programación dinámica son algunas de las técnicas utilizadas en la resolución de problemas dinámicos. Según Cárdenas (ver referencia 3), las características de un problema apropiado para la utilización de la programación dinámica son las siguientes:

- 1) El problema se puede dividir en períodos, y en cada período hay que tomar una decisión.
- 2) En cada período existen diversos estados.
- 3) El resultado de una decisión, estando en cierto estado de un período es pasar a otro estado del siguiente período.
- 4) Si se especifica el estado presente, la política de decisiones óptima para el resto de las etapas será independiente de la política seguida en etapas anteriores.

La última característica se basa directamente en el teorema de optimidad, que se describirá más adelante.

Como se puede apreciar, el problema de operar en forma óptima sistemas de plantas hidroeléctricas tiene características similares a las enunciadas anteriormente. El funcionamiento del sistema hidráulico se puede dividir en meses, semanas o días. Los diversos estados para cada período pueden ser volúmenes almacenados en cada presa, o niveles de superficie libre del agua. El resultado de tomar una decisión en el funcionamiento de presas consiste en bajar o subir de nivel, o cambiar de volumen almacenado mediante la extracción de agua por las turbinas para la producción de energía eléctrica.

A continuación se analiza el modelo matemático en que se basa la programación dinámica determinista.

### Modelo Matemático.

El modelo matemático que representa un problema dinámico tal como el dado por la determinación de políticas óptimas de operación de presas se denomina a veces " Modelo matemático con futuro indeterminado " (ver referencia 1), y puede plantearse como sigue:

Sea un sistema donde el estado en una fecha  $t$  ( $t=0,1,2,\dots,T$ ) está definido por un vector de estado  $\bar{x}_t$  (o, en particular, por una variable escalar de estado  $x_t$  ).

En cada fecha  $t$  es necesario tomar una decisión a causa de la cual se tendrá un vector de estado  $\bar{x}_{t+1}$  en la fecha  $t+1$ ; entonces, para cada vector de estado  $\bar{x}_t$  en la fecha  $t$  habrá un conjunto de vectores de estado posibles en la fecha  $t+1$  que se denominará  $\bar{x}_{t+1}^{+1}$ . Se deberá cumplir, por supuesto, que

$$\bar{x}_{t+1} \in \bar{x}_{t+1}^{+1} \quad (\text{II.2.1.1})$$

Los conjuntos de vectores de estado posibles en cada fecha se relacionan a través de una función  $\Gamma^{+1}$  que, en general, cambia para cada período (ver figura II.2.1.1).

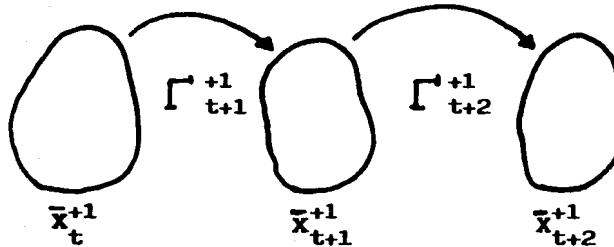


fig II.2.1.1

recíprocamente, para cada vector  $\bar{x}_{t+1}$ , existirá un conjunto de vectores de estado de origen posibles que resultan de aplicar la función inversa de  $\Gamma^{+1}$ , que se denotará como  $\Gamma^{-1}$  (ver figura II.2.1.2).

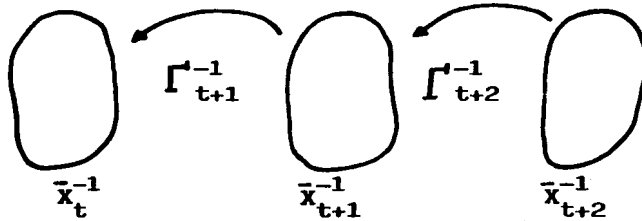


fig II.2.1.2

en este caso, también se debe cumplir que

$$\bar{x}_{t+1} \in \bar{x}_{t+1}^{-1} \quad (\text{II.2.1.2})$$

por lo tanto, a partir de las proposiciones (II.2.1.1) y (II.2.1.2) se tiene que

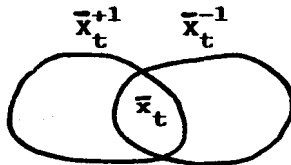


fig II.2.1.3

que expresado en términos matemáticos es

$$\bar{x}_t \in (\bar{x}_t^{+1} \cap \bar{x}_t^{-1}) \quad (\text{II.2.1.3})$$

Entonces, si se comienza del estado inicial  $\bar{x}_0$ , el conjunto de estados posibles del sistema quedará cada vez más pequeño al aplicar sucesivamente las funciones  $\Gamma^{+1}$  y  $\Gamma^{-1}$ . La función  $\Gamma$  será una función biunívoca que represente a la intersección de las funciones anteriores. Finalmente se tendrá la situación mostrada en la figura II.2.1.4.

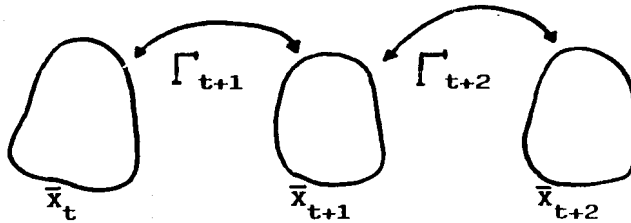


fig II.2.1.4

donde

$$\bar{x}_t \in \bar{x}_t \quad \bar{x}_t = \begin{Bmatrix} \bar{x}_0 \\ \bar{x}_1 \\ \vdots \\ \bar{x}_t \\ \vdots \\ \bar{x}_T \end{Bmatrix} \quad \bar{x}_t = \begin{Bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_t \\ \vdots \\ x_T \end{Bmatrix} \quad (\text{II.2.1.4})$$

Estando en cada período se toma una decisión, es decir, se escoge un vector de estado. Entonces, se llamará " política  $w$  de  $\bar{x}_0$  a  $\bar{x}_T$  " a la secuencia

$$f_{0,T}^w = (\bar{x}_0, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_T) \quad (\text{II.2.1.5})$$

donde  $w=1,2,\dots,z$  ;  $z$  puede tomar un valor finito o infinito dependiendo del tipo de modelo.

Existen muchas políticas de  $\bar{x}_0$  a  $\bar{x}_T$  , pero solamente una es óptima .

La política  $K$  quedara definida de la siguiente forma:

A toda política  $f_{0,T}^w$  se le asocia un valor  $s$  definido por

$$s(f_{0,T}^w) = \sum_{t=1}^T s(f_{t-1,t}^w) \quad (\text{II.2.1.6})$$

donde  $s(f_{t-1,t}^w)$  es el valor asociado a la toma de decisiones en el período  $t$ .

La política óptima sera aquella política que tenga el máximo valor de  $s(f_{0,T})$  y se define como:

$$K = f_{0,T}^k \quad (\text{II.2.1.7})$$

donde

$$s(f_{0,T}^k) = \text{MAX } s(f_{0,T}^w) \quad (\text{II.2.1.8})$$

$$f_{0,T}^w \in Z$$

donde Z es el conjunto de políticas de  $\bar{x}_0$  a  $\bar{x}_T$  y MAX significa que el valor asociado s se maximiza.

Por otra parte, para  $0 \leq i \leq j \leq T$ , se llamará " subpolítica de  $x_i$  a  $x_j$  " a toda secuencia

$$f_{i,j} = \{ x_i, x_{i+1}, \dots, x_t, \dots, x_j \} \quad (\text{II.2.1.9})$$

Se dice que una subpolítica de  $\bar{x}_i$  a  $\bar{x}_j$  es óptima si su valor asociado

$$s(f_{i,j}) = \sum_{t=i+1}^j s(f_{t-1,t}) \quad (\text{II.2.1.10})$$

es máximo entre todas las subpolíticas posibles de  $\bar{x}_i$  a  $\bar{x}_j$ .

Considerando una política óptima

$$K = (\bar{x}_0, \dots, \bar{x}_i^k, \dots, \bar{x}_j^k, \dots, \bar{x}_T) \quad (\text{II.2.1.11})$$

La subpolítica formada por  $\{ \bar{x}_i^k, \dots, \bar{x}_j^k \}$  es óptima de  $\bar{x}_i^k$  a  $\bar{x}_j^k$ , puesto que si no lo fuera, existiría una subpolítica en ese intervalo con un valor asociado mayor, que pudiera reemplazarla.

Basado en las consideraciones anteriores, se puede enunciar el teorema de optimidad (principio de optimidad)

" Toda subpolítica  $f_{i,j}$  extraída de una política óptima  $K(\bar{x}_0, \bar{x}_T^k)$ , es en sí óptima de  $\bar{x}_i$  a  $\bar{x}_j$  ."

Este teorema permite, considerando 1,2,3,...,T períodos, construir progresivamente una política óptima, ya sea de 0 a T, o bien de T a 0.



### II.2.2 Método de solución propuesto.

En este trabajo, para resolver el problema de optimación de un sistema de presas, se utiliza la programación dinámica determinista de acuerdo con lo expuesto en la parte II.2.1 bajo las siguientes consideraciones:

- a) Se divide el intervalo de tiempo durante el cual se quiere optimar el funcionamiento del sistema (T), en m periodos, los cuales usualmente son de igual duración para facilitar el uso de un algoritmo computacional.
- b) El estado del sistema de presas en una fecha t queda definido mediante el vector  $\bar{h}$ , donde  $\bar{h} \equiv \bar{h}(i,n)_t$ ;  $i=1,2,\dots,niv_n$ , donde  $niv_n$  es el nivel máximo en la presa n;  $n=1,2,\dots,m$ , donde m es el número total de presas del sistema;  $t=0,1,2,\dots,T$ , donde T es el intervalo de tiempo durante el cual se quiere optimar el funcionamiento de las presas.
- c) A partir de la ecuación II.1.1, el volumen almacenado al final de un período t será

$$\bar{V}_{t+1} = \bar{V}_t + [T] (\bar{R} + \bar{D})_t - \bar{W}_t \quad (II.2.2.1)$$

donde  $\bar{V}_{t+1}$  es el volumen almacenado en el sistema para la fecha t+1.

El procedimiento de solución consiste en determinar el volumen de extracción para cada presa del sistema en cada período\*, tal que el beneficio obtenido en el sistema completo en un intervalo de tiempo T sea máximo.

---

\* El volumen de extracción se obtiene mediante la fijación de una política que determine los niveles iniciales y finales en el vaso de la presa para cada período.

La función objetivo para el sistema será la versión discreta de la ecuación (II.1.10a).

$$Z = \max_K \left\{ \sum_t B_t(K) \right\} \quad (\text{II.2.2.2})$$

donde  $B_t$  es el beneficio neto esperado del sistema en el período  $t$ , asociado a la política de extracción  $K$ .

El proceso de maximización queda descrito por la siguiente ecuación recursiva basada en el principio de optimidad, (ver capítulo II.2.1).

$$f(\bar{H})_t = \max s(\bar{H}, \bar{k})_t \quad (\text{II.2.2.3})$$

y la política óptima de operación es

$$\text{POL}(\bar{H})_t = \bar{k}_{\max_t} \quad (\text{II.2.2.4})$$

donde  $s(\bar{H}, \bar{k})_t$  es el valor esperado de la función objetivo acumulada hasta el período  $t$ , dado que al inicio del período el sistema se encuentra en el estado  $\bar{H}_t$  y se toma la decisión  $\bar{k}_t$ ;  $\bar{k}_{\max_t}$  es la decisión para el conjunto de presas que define el valor máximo en la ecuación (II.2.2.3).

#### Algoritmo de cómputo.

El algoritmo se basa en las ecuaciones (II.2.2.1) a la (II.2.2.4) y es el siguiente.

En el período  $t+1$ , en la presa  $n$  se tiene almacenado un volumen de agua  $V(i)_{t+1}$ , al que le corresponde una elevación sobre el nivel del mar  $H(i)_{t+1}$ . La elevación y el volumen almacenado están en función del nivel  $i$ , ver figura II.2.2.1.

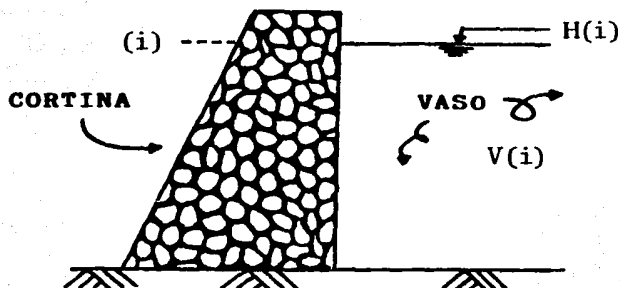


fig. (II.2.2.1)

El incremento de volumen en el período  $t$  será (ver ecuación II.1.1)

$$\Delta V_t = X_t - R_t - D_t - W_t \quad (\text{II.2.2.5})$$

A cada volumen almacenado le corresponde un nivel en el vaso, por lo tanto el estado del sistema puede quedar indistintamente definido en función de volúmenes almacenados, elevaciones de la superficie libre del agua o niveles, aunque desde el punto de vista operativo es mejor con elevaciones o niveles. En este algoritmo, en particular, se trabajará con niveles.

Entonces el volumen almacenado en el período  $t+1$  en la presa  $n$  será:

$$V(i)_{t+1} = V(i)_t + V_t \quad (\text{II.2.2.6})$$

sustituyendo la ecuación (II.2.2.5) en la ecuación (II.2.2.6) se tiene que

$$V(i,n)_{t+1} = V(i,n)_t + X(n)_t - R(n)_t - W(n)_t - D(n)_t \quad (\text{II.2.2.7})$$

o bien para el sistema de presas

$$\bar{V}(i,n)_{t+1} = \bar{V}(i,n)_t + \bar{X}(n)_t - \bar{R}(n)_t - \bar{W}(n)_t - \bar{D}(n)_t \quad (\text{II.2.2.8})$$

Al utilizar la programación dinámica determinista, el vector  $\bar{X}_t$  es conocido. El vector  $i$  se compone de  $m$  elementos, para el periodo  $t$ , que están restringidos dentro del rango  $i=1,2,\dots,niv$ . Para el periodo  $t$  el estado del sistema está definido por el vector  $\bar{i}_t$ , esto es, el vector  $\bar{i}_t$  es conocido. Si se dan valores al vector  $\bar{i}_{t+1}$  dentro del rango  $i=1,2,\dots,niv$  se obtendrán los valores de  $\bar{R}(n)_t$ ,  $\bar{W}(n)_t$  y  $\bar{D}(n)_t$ .

Introduciendo  $\bar{R}(n)_t$  en la ecuación (II.1.4) se tiene que

$$\bar{G}(\bar{i})_t = \delta ( \alpha_1 R_1 Hm_1 , \alpha_2 R_2 Hm_2 , \dots , \alpha_m R_m Hm_m )_t \quad (II.2.2.9)$$

donde  $\bar{G}(\bar{i})_t$  es la generación de energía eléctrica del sistema en el periodo  $t$ ;  $\alpha$  es una constante para cada planta;  $\delta$  es el peso específico del agua;  $R$  es el gasto de extracción turbinado y  $Hm$  es la carga promedio sobre las turbinas en el periodo  $t$ , esto es

$$Hm_t = \frac{H(i)_{t'} + H(i)_{t-1'}}{2} \quad (II.2.2.10)$$

donde  $t'$  es el final del periodo  $t$  y  $t-1'$  es el inicio del periodo  $t$ . Posteriormente con ayuda de la fórmula (II.1.7) se obtiene el beneficio correspondiente del sistema para el vector  $i_t$

$$\bar{B}(\bar{i})_t = \bar{g} ( \bar{G}(\bar{i})_t ) - \bar{h} ( \bar{D}_t ) \quad (II.2.2.11)$$

donde  $\bar{g}$  y  $\bar{h}$  son vectores de funciones que relacionan el beneficio por generación y los daños por derrames para cada presa respectivamente;  $\bar{D}_t$  es un vector de gastos derramados por el vertedor para el periodo  $t$ .

Por lo tanto, para cada periodo se tendrán  $niv_1 \times niv_2 \times \dots \times niv_n \times \dots \times niv_m$  valores de beneficio, recordando que  $niv_n$  es el número máximo de niveles en la presa  $n$ , y  $m$  es el número total de presas.

Para cada vector  $\bar{i}_t$  se calcula el beneficio con la ecuación (II.2.2.11) del sistema, y se escoge el vector  $\bar{i}_t$  que produzca el máximo beneficio

siendo éste la política de operación del sistema.

$$B_{\text{máx}}_t = b(k_1)_t + b(k_2)_t + \dots + b(k_n)_t + \dots + b(k_m)_t \quad (\text{II.2.2.12})$$

donde  $b(k_n)_t$  es el beneficio asociado a la decisión  $k$  en la presa  $n$  durante el período  $t$ , y  $B_{\text{máx}}_t$  es el beneficio máximo que se produce en el sistema al escoger el vector de decisión  $\bar{k}_t$ . Cabe señalar que el valor de  $k_n$  puede no producir un beneficio máximo en algunas presas del sistema desde el punto de vista aislado, pero como decisión de conjunto sí lo hace.

La aplicación de este método al Sistema Eléctrico Nacional Interconectado puede ser de gran utilidad al tratar de optimar todas las presas del sistema en forma global.

Una vez obtenida la política de operación para el período  $t$ , se continúa con el período  $t-1$ , y así sucesivamente hasta el período 1. El beneficio que se obtuvo de aplicar la política  $\bar{k}_t$  se suma al beneficio acumulado a lo largo de la trayectoria  $T \rightarrow t$ , donde  $T > t$ . Cabe señalar que el algoritmo es recursivo de Futuro  $\rightarrow$  Pasado.

El número de alternativas para cada período crece en forma exponencial con el número de presas que formen al sistema, pero al momento de aplicar el algoritmo a un problema específico el número se reduce notablemente a una región denominada de soluciones factibles lo cual se explicara con más detalle en el capítulo de aplicaciones.

### III APLICACIONES

#### III.1 SISTEMA EL INFIERNILLO.

##### III.1.1 Descripción del sistema El Infiernillo.

La presa El Infiernillo se ubica sobre el río Balsas, en los límites de los estados de Guerrero y Michoacán, aproximadamente a 70 Km. de su desembocadura al Océano Pacífico. La presa fué construída por la C.F.E. durante los años de 1961 a 1963 con la finalidad de aprovechar sus aguas en la generación de energía eléctrica y control de avenidas.

La cortina, de 148.50 m de altura, es de enrocamiento con núcleo delgado de arcilla. La planta hidroeléctrica subterránea tiene una potencia total instalada de 1075 MW.

Los datos técnicos más importantes son (ver referencia 5) :

- Capacidad total al NAME	12000 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
- Capacidad útil	7090 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
- Nivel máximo de embalse	176.40 m
- Nivel normal (NAMO)	169.00 m
- Nivel mínimo (NAMINO)	140.00 m
- Altura máxima de la cortina	181.00 m
- Obra de toma	
. Número	3
. Caudal de diseño	1160.40 m <sup>3</sup> /s
- Casa de Máquinas	
. Turbinas	6 Francis
. Carga neta de diseño	101.00 m
. Caudal de diseño	182.50 m <sup>3</sup> /s

### III.1.2 DESCRIPCION DEL PROGRAMA.

Para optimar el funcionamiento de la presa El Infiernillo, se diseñó un programa de cómputo en TURBO-PASCAL para ser ejecutado en cualquier P.C.

El programa está escrito de manera estructurada y para cada subrutina existe una pequeña explicación (ver anexo 1). Las variables que intervienen en él están diseñadas para que el usuario pueda utilizar el mismo programa para optimar el funcionamiento de otras presas efectuando cambios menores a funciones y constantes.

Para la optimación de El Infiernillo se tomaron en cuenta las siguientes -- consideraciones :

- . Se escogió la presa El Infiernillo para probar la eficacia del método dado que cuenta con la información apropiada además de ser una de las presas en México que más daños produce al derramar volúmenes excesivos de agua.
- . Se utilizaron 49 años de registros mensuales de escurrimiento, desde 1925 a 1973, medidos en el lugar donde se localiza actualmente la presa.
- . Entre el NAMINO y el NAMO se efectuaron 9 divisiones que corresponden a volúmenes iguales. A cada una de estas divisiones le corresponde un nivel de superficie libre y un volumen almacenado (ver figura III.1.1).
- . La apertura de compuertas, y por lo tanto los derrames, comienzan cuando el agua alcanza el NAMO.

Las restricciones preliminares al programa son :

- . El gasto máximo de extracción mensual por las turbinas es de  $2838 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/mes.
- . Se castigan fuertemente los derrames, ver figura III.1.2, donde a partir de un volumen derramado, se asocia un beneficio en millones de pesos (1982) el costo de los daños que se pueden ocasionar aguas abajo. Esta gráfica se obtuvo de la referencia 2. Cabe recalcar que los pesos corresponden al año de 1982. Se efectuaron pequeños cambios en la gráfica para ser utilizada en el programa de simulación, (ver gráfica).

- Se asocia un beneficio proporcional a la geración de energía eléctrica se castiga por incumplimiento de la demanda. En la figura III.1.3 se muestra la situación, donde los segmentos de la gráfica corresponden a la zona de déficit, generación óptima y sobre-generación. Esta gráfica también se obtuvo de la referencia 2.

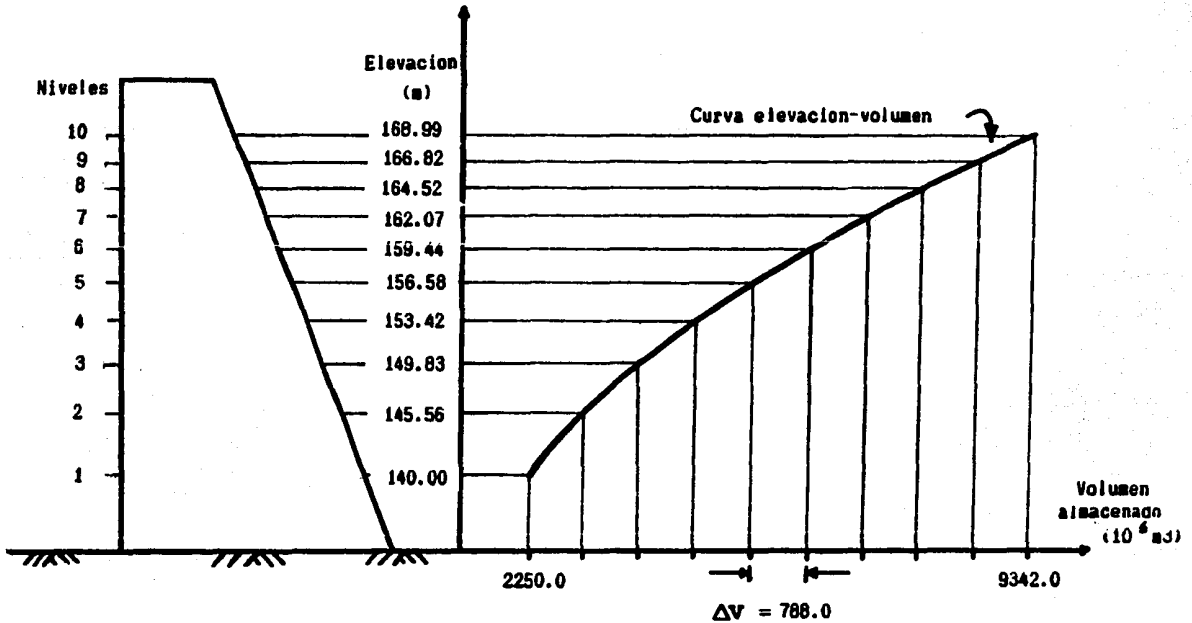


fig III.1.1

En el anexo 1 se muestra un diagrama de flujo que representa esquemáticamente el procedimiento seguido por el programa de cómputo. El programa optimiza del presente al pasado, es decir, comienza en el año 1973 y termina en el año 1925, debido a que se contaba solamente con los datos correspondientes a estos años. El programa está diseñado para obtener la política óptima dentro de cualquier intervalo comprendido entre los años enumerados anteriormente a partir de cualquier mes y finalizando con el mes y año que se desee.

Se observó en corridas preliminares que, para los meses de lluvia, sería conveniente restringir el nivel máximo de operación (NAMO) a un nivel inferior al utilizado en la época de estiaje, para prevenir derrames de grandes volúmenes de agua. El usuario puede a voluntad cambiar el NAMO.



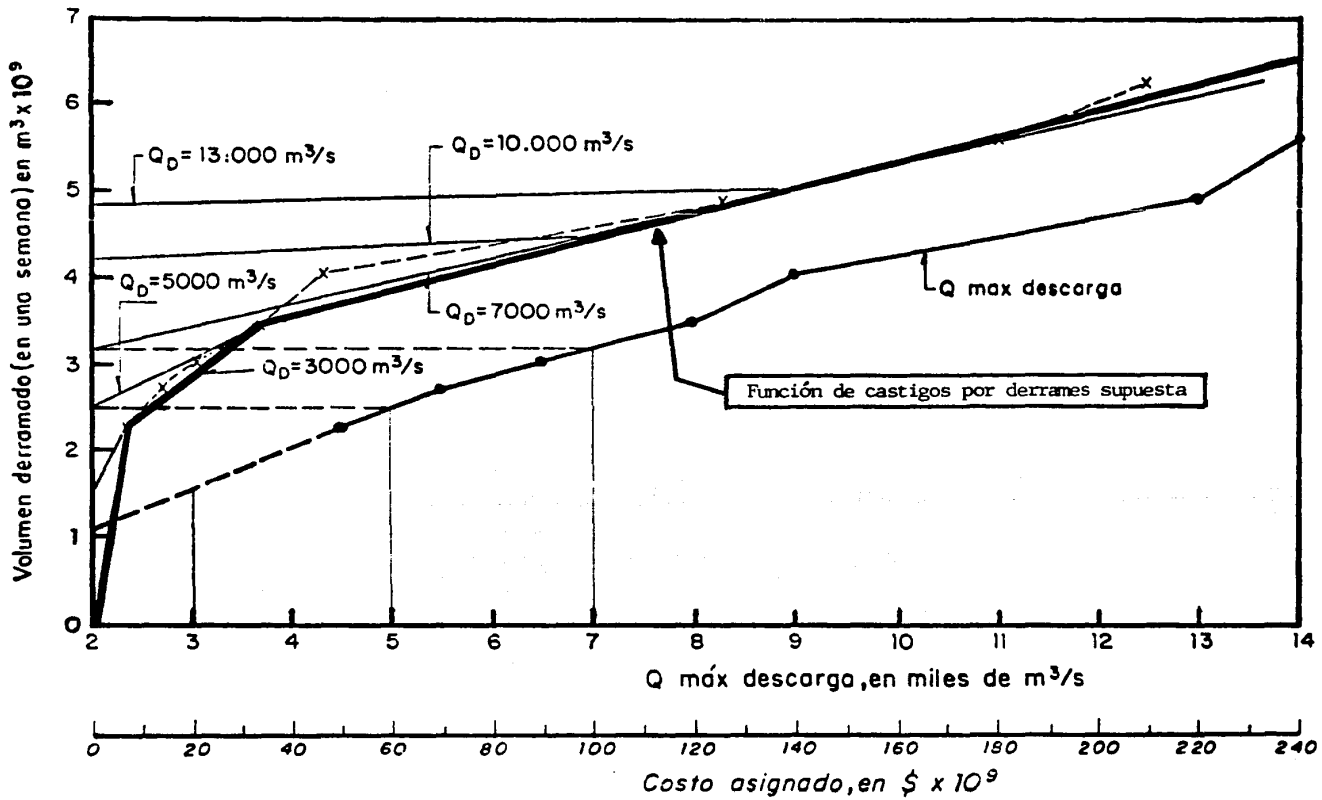
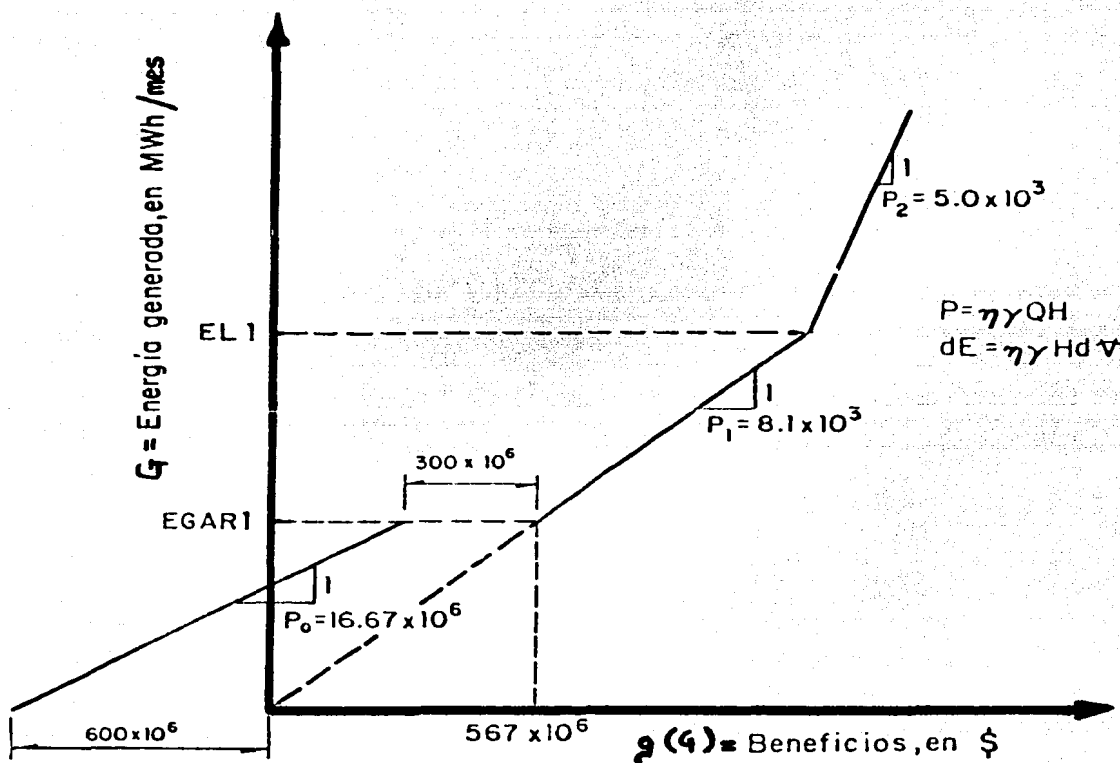


fig III.1.2



EGAR1 = 70 000 MWh/mes  
 EL1 = 350 000 MWh/mes

fig III.1.3



Asociado a cada extracción se tiene una generación producida por el paso del agua por las turbinas. Esta potencia asociada a cada nivel, aplicada durante un intervalo de tiempo (un mes) produce una energía, la cual proporciona un beneficio en millones de pesos de 1982 (ver fig.III.1.3). El problema escoge aquel nivel en la fecha  $t$  que proporciona el beneficio máximo al pasar al nivel  $s$  en la fecha  $t+1$ . El escogido se denomina la decisión  $k_t$ , y pasa a formar parte de la operación de la presa.

Para la próxima fecha ( $t+1$ ), se efectúa el mismo procedimiento, esta vez siendo la decisión  $k_t$  el nivel al cual se debe llegar a partir de los niveles en la fecha  $t+1$ . El beneficio obtenido en el período  $t+1$  se suma al beneficio que se ha venido acumulando desde el principio del intervalo de optimización, en este caso la fecha  $T$  (Diciembre 1973).

A continuación se presentarán las fórmulas que intervienen en el programa.

#### Función objetivo.

A partir de la ecuación (II.1.9), para el caso de una presa se tiene

$$\beta = \int_0^T B dt = \int_0^T (g(G) - h(D)) dt \quad (\text{III.1.9})$$

donde  $G$  es la energía generada ;  $D$  es el volumen derramado ;  $g$  es la función que se describe en la figura III.1.3 ;  $h$  es la función que se muestra en la figura III.1.2 .

En forma de ecuaciones, estas funciones se pueden expresar como:

$$g(G) = \begin{cases} (G/80.738) - 600 & G < 70,000 \text{ MWh/mes} \\ 0.003 G & 70,000 \leq G < 350,000 \text{ MWh/mes} \\ (0.005 G) + 1,085 & G \geq 350,000 \text{ MWh/mes} \end{cases}$$

$g(G)$  en millones de pesos (1982)

(III.1.10)

$$h(D) = \begin{cases} D/0.225 & D < 2,250 \text{ m}^3/\text{mes} \\ (23.485 D) - 46,969.7 & 2,250 \leq D < 3,900 \text{ m}^3/\text{mes} \\ (66.54 D) - 216,255.0 & D \geq 3,900 \text{ m}^3/\text{mes} \end{cases}$$

$h(D)$  en millones de pesos (1982) (III.1.11)

G se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$G = (\text{potencia}) \times (\text{tiempo}) \quad (\text{III.1.12})$$

donde

$$\text{potencia} = \alpha QH \quad (\text{III.1.13})$$

donde

Q = gasto de extracción (en  $10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$ )

H = carga neta media mensual sobre las turbinas (m)

$\alpha$  = constante que incluye al peso específico del agua ( $\gamma$ ), la eficiencia del sistema ( $\eta$ ) y un factor de conversión de unidades para que la potencia se obtenga en MWh/mes.

Al aplicar esta potencia durante el intervalo de un mes se obtiene la ecuación de energía

$$G = (\text{potencia}) \times (1\text{mes}) \quad (\text{III.1.14})$$

El valor de G es el que se utiliza en la función objetivo (II.1.9) para obtener un beneficio determinado.

#### Curva elevación - volúmenes.

La función que relaciona la elevación con el volumen de la presa es la siguiente (ver referencia 2).

$$\text{Elevación} = 126.667 + \frac{(1000 + (12.8 (\text{volumen} - 2250)))^{0.5}}{7.5} \quad (\text{III.1.15})$$

Si el usuario desea optimar el funcionamiento de otra presa, se deben alterar las funciones anteriores dentro del programa, (ver anexo 1).

### Datos de entrada

Se ingresaron en un archivo externo los valores de gastos de entrada mensuales al programa durante los años 1925-1973 (datos de la C.F.E., ver referencia 5). Los gastos de entrada se encuentran en  $10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$ . En el anexo 1 se muestra el programa que crea el archivo y se explica la forma de operarlo. Dentro del programa de optimización el archivo es leído en forma completa antes de empezar a optimizar el funcionamiento de la presa.

Las evaporaciones se descartaron para simplificar el programa, en vista de que no influyen en forma decisiva en la determinación de la política óptima. Lo anterior fue comprobado en el sistema La Angostura - Malpaso donde se incluyó la evaporación para el vaso de la presa La Angostura y se efectuaron corridas con evaporaciones y sin ellas, encontrándose prácticamente los mismos resultados.

### III.1.3 Comentarios al programa

Cuando se efectuaron las primeras corridas existían problemas para asegurar que el programa tuviera continuidad en el tiempo, esto es, que fuera capaz de optimar el funcionamiento continuo de la presa dentro de un intervalo de años dado.

El problema se presenta cuando al vaso ingresan grandes volúmenes mensuales y es imposible pasar de cualquier nivel en la fecha  $t-1$  al nivel  $i$  escogido en la fecha  $t$ .

Esto se explica mejor a través de un ejemplo numérico:

Supóngase que a finales del mes de julio la presa se encuentra en el nivel 8. Si para ese mes existe una entrada muy grande al sistema, entonces el programa escoge un nivel bajo para principios de julio, tratando de evitar derrames ( como por ejemplo, el nivel 1 ), ver figura III.1.5 .

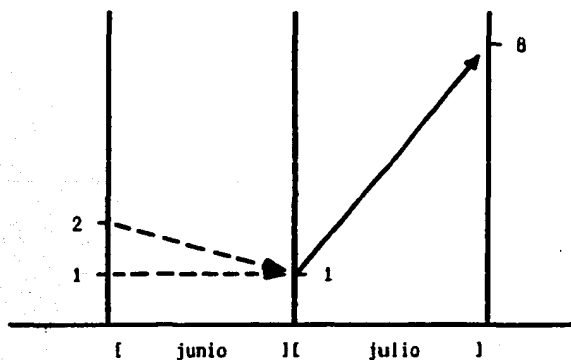


fig. III.1.5

Supóngase ahora que , para el siguiente mes, junio<sup>\*</sup>, existe otra gran entrada al sistema ( por ejemplo  $3,500 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$  ). Si se quiere pasar del nivel 1 a principios de junio al nivel 1 a fines de junio, se necesita extraer el mismo volúmen de agua que entró al sistema. Si se quiere pasar del nivel 2 al 1, se necesita extraer no solamente lo que entró al sistema, sino que, además, el volúmen almacenado en el vaso entre los niveles 1 y 2.

\* Recuerdese que la optimación se realiza hacia atrás en el tiempo.

Si se tiene restringido el volúmen mensual máximo de extracción a  $2,838 \times 10^6 \text{ m}^3$ , se produce un problema de discontinuidad en junio, dado que no se puede extraer los  $3,500 \times 10^6 \text{ m}^3$  que entraron; por ende, no se puede pasar del nivel 1 a principios de junio al nivel escogido a fines de junio (nivel 1), y mucho menos pasar de niveles superiores al nivel escogido; además, no existen niveles iguales o inferiores a cero dado que a partir del nivel 1 hacia abajo, el nivel del agua estaría bajo el NAMINO.

Para solucionar el problema se ideó un algoritmo que se incorporó en el programa de cómputo, que es el siguiente:

A partir de la ecuación de continuidad ( ver ecuación II.2.2.7 ) se tiene para el mes de junio, nivel 1

$$V(1)_{t-1} = V(1)_t + X_t - R_t - D_t - W_t \quad (\text{III.1.16})$$

donde  $t-1$  = principio del mes de junio

$t$  = final del mes de junio

Para estos niveles no existen derrames, y suponiendo que no existen pérdidas considerables por evaporación o infiltración se tiene que

$$D_t = W_t = 0$$

Entonces la ecuación (III.1.16) queda

$$V(1)_{t-1} = V(1)_t + X_t - R_t \quad (\text{III.1.17})$$

para que esta ecuación se cumpla es necesario que

$$R_t - (\text{delvol}/2) \leq X_t \leq R_t + (\text{delvol}/2) \quad (\text{III.1.18})$$

donde delvol es el volúmen almacenado en la presa entre dos niveles que es constante, y para el caso de la presa El Infiernillo es  $778 \times 10^6 \text{ m}^3$ .



Entonces , si  $(\text{delvol}/2) = 394 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$  , entonces la ecuación (III.1.18) queda

$$R_t - 394 \leq X_t \leq R_t + 394 \quad (\text{III.1.19})$$

si consideramos que el máximo valor que puede tomar R es  $2838 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$  entonces la ecuación (III.1.19) queda

$$\begin{aligned} 2,838 - 394 &\leq X_t \leq 2,838 + 394 \\ 2,444 &\leq X_t \leq 3,232 \end{aligned} \quad (\text{III.1.20})$$

El valor de  $X_t$  es de 3,500 , por lo tanto la ecuación no se cumple para el mes de junio, entonces es necesario efectuar lo siguiente para permitir la continuidad:

Se obliga a que el gasto de entrada al sistema sea igual al gasto máximo de extracción para que se cumpla la ecuación (III.1.20).

El excedente de agua (Y) que no entró al sistema es

$$Y_t = X_t - Q_{\text{MAX}} \quad (\text{III.1.21})$$

donde  $Q_{\text{MAX}}$  es el gasto máximo de extracción ( $2,838 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$ ).

Siguiendo el ejemplo numérico, sustituyendo valores en la ecuación (III.1.21) se tiene

$$\begin{aligned} Y_t &= 3,500 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes} - 2,838 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes} \\ Y_t &= 662 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes} \end{aligned} \quad (\text{III.1.22})$$

El valor de Y se suma a la entrada del próximo período ( mes de mayo).

$$X_{t-1} = X_t + Y_t \quad (\text{III.1.23})$$

Si se vuelve a presentar el mismo problema que en junio, el algoritmo efectúa el mismo procedimiento y suma el excedente al mes de abril. De esta manera, además de asegurar la continuidad del algoritmo de optimización, pensando en términos de la operación real de la presa, se tiene que los volúmenes en el vaso empiezan a ser disminuidos antes de que se presenten las grandes entradas al sistema. De esta manera se evitan grandes derrames.

### III.1.4 Resultados.

El programa imprime en pantalla o impresora ( según indique el usuario) una tabla como la III.1.4.1 .

#### OPTIMACION SISTEMA PRESA EL INFIERNILLO

nivel[ 1]= 140.00	volumen[ 1]= 2250.00
nivel[ 2]= 145.56	volumen[ 2]= 3038.00
nivel[ 3]= 149.83	volumen[ 3]= 3826.00
nivel[ 4]= 153.42	volumen[ 4]= 4614.00
nivel[ 5]= 156.58	volumen[ 5]= 5402.00
nivel[ 6]= 159.44	volumen[ 6]= 6190.00
nivel[ 7]= 162.07	volumen[ 7]= 6978.00
nivel[ 8]= 164.52	volumen[ 8]= 7766.00
nivel[ 9]= 166.82	volumen[ 9]= 8554.00
nivel[10]= 168.99	volumen[10]= 9342.00

#### \*\*\*\*\* RESULTADOS \*\*\*\*\*

FECHA	MES	ENTRADAS	NF	NI	Q-E	DERRAME	POT	BENEFICIO	BENEF-ACUM
1971									
564	DIC	633.0	10	10	633.0	0.0	185317.8	556.0	556.0
563	NOV	938.0	10	10	938.0	0.0	274609.9	823.8	1379.8
562	OCT	4348.0	10	8	2772.0	0.0	796345.9	5066.7	6446.5
561	SEP	5286.0	8	5	2838.0	84.0	772161.7	4572.5	11019.0
560	AGO	3306.0	5	4	2518.0	0.0	650852.5	4339.3	15358.2
559	JUL	2028.0	4	5	2816.0	0.0	727879.5	4724.4	20082.6
558	JUN	860.0	5	7	2436.0	0.0	655481.9	4362.4	24445.1
557	MAY	255.0	7	8	1043.0	0.0	290793.4	872.4	25317.4
556	ABR	287.0	8	8	287.0	0.0	80877.5	242.6	25560.1
555	MZO	242.0	8	10	1818.0	0.0	522278.8	3696.4	29256.5
554	FEB	361.0	10	10	361.0	0.0	105686.7	317.1	29573.5
553	ENE	492.0	10	10	492.0	0.0	144038.4	432.1	30005.6
		19036.0			18952.0	84.0		30005.6	

gasto+derrames= 19036.0

Nivel maximo en epoca de lluvias = 8

Entradas, Gasto de extraccion, Derrames ..... = millones.M3/mes  
 Nivel Inicial, Nivel Final ..... = metros  
 Potencia ..... = Mw/hr/mes  
 Beneficios ..... = millones pesos

tabla III.1.4.1

En esta tabla se ejemplifican los resultados solamente para un año.

El programa imprime los resultados para todos los años como en la tabla III.1.4.1 , y al finalizar imprime el beneficio acumulado durante los años de optimación.

Se efectuaron corridas de optimación para los 49 años de registro de entradas , restringiendo los niveles máximos de operación durante la época de lluvias, desde el nivel 7 hasta el nivel 10 para observar cuál restricción produce el mayor beneficio.

Reduciendo el NAMO se tienen menos derrames, pero también se tiene menos carga sobre las turbinas.

El beneficio acumulado para diversas restricciones del NAMO se muestra en la tabla III.1.4.2

Nivel máximo en época de lluvias	Beneficio acumulado en miles de millones de pesos
10	1.203
9	1.180
8	1.226
7	1.186

tabla III.1.4.2

Nivel máximo en época de lluvias	Volumen total derramado en millones de m3	volumen total turbinado en millones de m3
10	1,236.0	741,376.0
9	1,347.0	742,309.0
8	1,027.0	743,226.0
7	992.0	743,640.0

tabla III.1.4.3

En la tabla III.1.4.3 se muestran los volúmenes derramados y turbinados entre 1925 y 1973 .

De las tablas anteriores se observa que operando con el nivel 8 como NAMO en la época de lluvias, se obtiene el máximo beneficio; además, el volumen derramado es inferior que el volumen derramado con niveles superiores a 8, a pesar de que al utilizar como nivel máximo en épocas de lluvias el nivel 7 se obtienen volúmenes derramados menores , pero con un menor beneficio por generación.

Por lo tanto se decide efectuar un análisis más a fondo de la corrida correspondiente al nivel 8 como nivel máximo en época de lluvia.

En la tabla III.1.4.4 se muestra la frecuencia con que se alcanzó cada uno de los 10 niveles en que se dividió el vaso de la presa El Infiernillo, en cada mes, con la restricción del nivel 8 como NAMO de abril a septiembre.

NIVEL	MES											
	ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1							2	2	2			
2												
3						2	4					
4						2	6	6				
5						2	2	8	4			
6					4	6	16	18	18			
7						6	12	8	6	2		
8				100	96	82	58	58	70	6		
9										14	4	
10	100	100	100							78	96	
MEDIA	10.00	10.00	10.00	8.20	7.92	7.59	6.92	6.94	7.32	9.68	9.96	10.00

tabla III.1.4.4

A partir de los resultados de la tabla III.1.4.4 se determina una política inicial de operación (ver tabla III.1.4.5) la cual se obtiene a partir de los niveles promedio para cada mes, redondeando el valor del nivel hacia abajo, operando bajo un criterio de mayor seguridad. Por ejemplo si el promedio es 6.94 , el nivel a utilizar es 6 .

Política inicial de operación para la presa El Infiernillo											
ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
10	10	10	8	7	7	6	6	7	9	10	10

tabla III.1.4.5

Se diseñó un programa en TURBO-PASCAL que simula el funcionamiento de la presa con la política de operación mostrada en la tabla III.1.4.5 , desde 1925 hasta 1973. Se obtiene como resultado el beneficio total acumulado durante los años de análisis. Posteriormente, se efectúan pequeños cambios de niveles a la política inicial de operación y se simula el comportamiento de la presa comparando los resultados en la tabla III.1.4.6 para encontrar aquella política que produce máximos beneficios.

Política de operación para la presa El Infiernillo												Beneficio acumulado
ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	en millones de pesos
10	10	10	8	7	7	6	6	7	9	9	10	1'088,264.5
10	10	10	8	7	7	6	6	7	9	10	10	1'086,097.0
10	10	10	8	7	7	5	6	7	9	9	10	1'098,697.9
10	10	10	8	7	7	5	6	7	9	10	10	1'100,032.5
10	10	10	8	7	6	5	5	7	9	10	10	1'024,363.4
10	10	10	8	7	6	5	6	7	9	10	10	1'106,037.5
10	10	10	10	8	6	5	6	7	9	10	10	1'190,814.3
10	10	10	10	7	6	5	6	7	8	10	10	1'185,232.2
10	10	10	10	7	6	5	6	7	9	10	10	1'115,237.5
10	10	10	10	8	5	5	6	7	9	10	10	1'113,182.9

tabla III.1.4.6

De la tabla III.1.4.6 se escoge aquella política que produce el máximo beneficio. Esta política pasa a ser la política óptima de operación para la presa El Infiernillo. En la tabla III.1.4.7 se muestra esta política.

Política óptima de operación para la presa El Infiernillo

ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
10	10	10	10	8	6	5	6	7	9	10	10

tabla III.1.4.7

Para la política óptima de operación se efectúa un análisis más detallado de los resultados. En la figura III.1.4.1 se muestra la frecuencia relativa de los derrames para los 49 años de análisis (1925 - 1973).

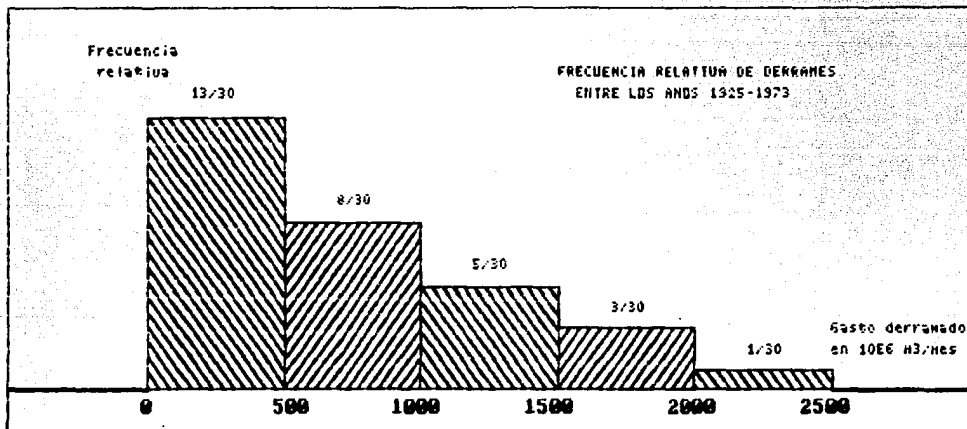


fig III.1.4.1

De la figura III.1.4.1 se observa que la mayor frecuencia de volúmenes mensuales derramados corresponde al rango de los 0.0 m<sup>3</sup>/mes a los 500.0 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/mes; además, la distribución de frecuencias se comporta en forma escalonada teniendo la frecuencia más baja para volúmenes mensuales mayores de 2,000.0 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/mes.

Con respecto a la generación de energía eléctrica, se observa en la figura III.1.4.2 que la mayor frecuencia se presenta dentro del rango normal de operación.

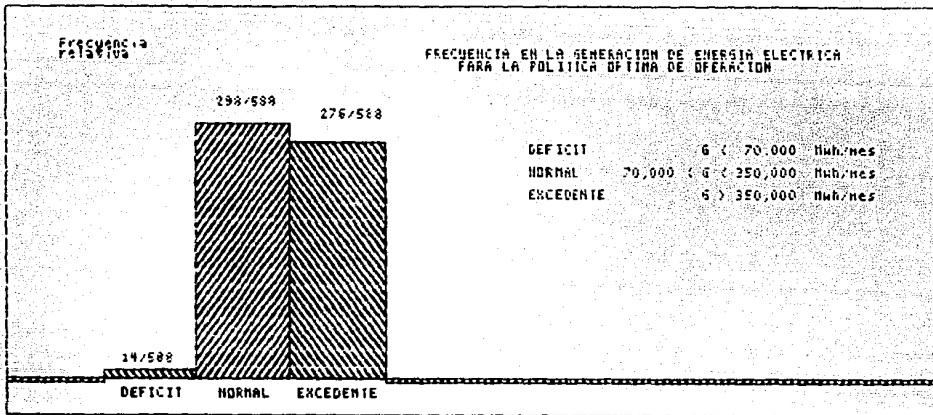


fig III.1.4.2

Cabe señalar que se observa también en la figura que la frecuencia en la que se genera energía en exceso es similar a la frecuencia en que se genera energía dentro del rango normal. Esto puede tener diversas explicaciones, no necesariamente excluyentes entre sí :

- La gráfica beneficio-energía generada (ver figura III.1.3 ) este mal valuada.
- La constante utilizada en la función de potencia ( ver ecuación III.1.13 ) sea demasiado alta.
- La presa haya sido diseñada para operar de manera menos óptima, y
- El algoritmo de optimización prefiere turbinar volúmenes aunque sea como energía excedente a derramarlos no turbinarlos, en cuyos casos el beneficio sería menor.

Independientemente de estudiar más a fondo la explicación para la frecuencia de energía en exceso, se observa en la figura que la frecuencia en que la presa opera dentro del rango de déficit es bastante bajo.



### III.1.5 Comparación de resultados con una política obtenida mediante la programación dinámica estocástica.

Se compararon los resultados con la política propuesta por Domínguez en la referencia 2.

En dicha publicación se presenta la trayectoria anual que tiene la probabilidad más alta de presentarse, mostrada en la figura III.1.5.1 ( ver fig 5.4 de la referencia 2).

Se denominará a esta trayectoria como " trayectoria óptima estocástica " para efectos de comparación.

Trayectoria óptima estocástica

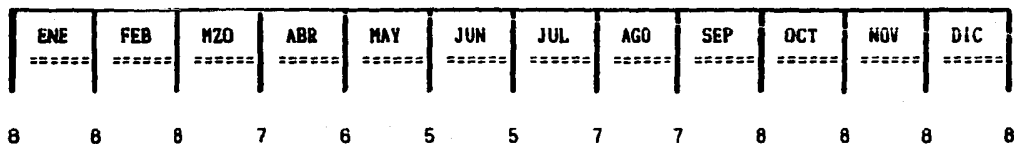


fig. III.1.5.1

d Donde la elevación correspondiente a cada nivel es la siguiente:

Nivel	Elevación (nans)
8	169.98
7	166.43
6	162.52
5	158.13

Se efectuaron algunos ajustes en la política de Domínguez para poder efectuar un análisis comparativo. Estos cambios se observan en la tabla III.1.5.1 .

Finalmente la política de Domínguez queda como se muestra en la tabla III.1.5.2 .

Correspondencia entre niveles	
Niveles (estocástica)	Niveles (determinista)
8	10
7	9
6	7
5	6

tabla III.1.5.1

Política óptima de operación (programación dinámica estocástica)											
ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
10	10	10	9	7	7	6	9	9	10	10	10

tabla III.1.5.2

Se efectuó una corrida de simulación con la política óptima estocástica de Domínguez. Los resultados son comparados con la política óptima utilizando la programación dinámica determinista en la tabla III.1.5.3 .

Comparación de resultados entre las políticas óptimas durante 1925 - 1973		
	Beneficio acumulado en millones de pesos	Volumen total derramado en millones de m <sup>3</sup>
Programación estocástica	977,958.2	52,762.0
Programación determinista	1'190,814.3	23,761.0

tabla III.1.5.3

Se observa en la tabla III.1.5.3 que en relación con el beneficio obtenido, los valores son similares para ambos métodos, pero donde no existe mucha similitud es en relación con los volúmenes derramados. La política óptima estocástica produce un volumen que es el doble al volumen derramado al utilizar la política óptima determinista.

Para poder efectuar una comparación más efectiva entre ambos métodos, se tendría que simular la política óptima estocástica en forma general. Esto se lleva a cabo en el siguiente capítulo para el sistema La Angostura-Malpaso .

### II.1.6 Comparación de resultados con la operación real del sistema.

Se diseñó un programa que simula el comportamiento real del sistema El Infiernillo entre los años 1974 y 1983, con datos reales de operación. El listado del programa así como los datos de entrada al sistema se presentan en el anexo 3.

Para efectuar una comparación entre la operación real y la operación propuesta por la política óptima determinista se efectuó una simulación con esta última entre los mismos años. Los resultados se muestran en la tabla III.1.6.1 .

Análisis comparativo entre el funcionamiento real  
y la simulación con la política óptima (1974 - 1983)

	Beneficio acumulado en millones de pesos	Volumen total derramado en millones de m <sup>3</sup>
Política real de operación	160,365.0	2,115.7
Política óptima de operación	213,010.3	6,088.1

tabla III.1.6.1

Se aprecia que los beneficios obtenidos con la política óptima son aproximadamente un 25% mayor que los beneficios obtenidos con la operación real, a pesar de que se derraman mayores cantidades de agua. En la figura III.1.6.1 se muestra la frecuencia en que se presentan los derrames utilizando la política óptima determinista de operación.

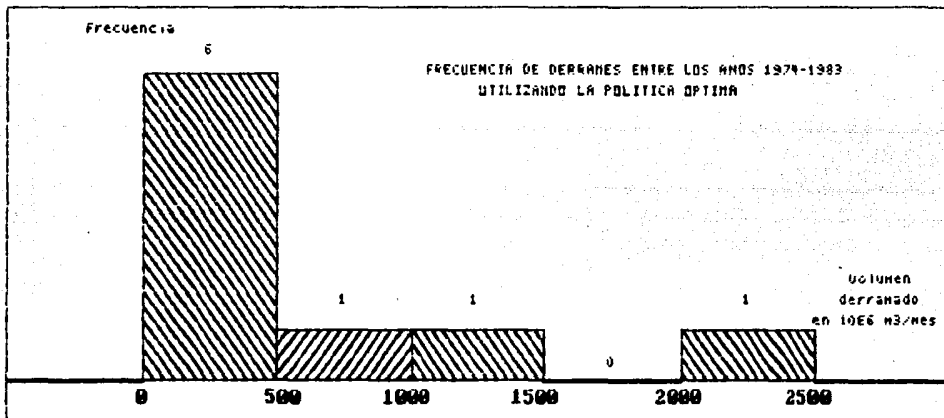


fig III.1.6.1

En la figura III.1.6.2 se observa la frecuencia de volúmenes derramados reales que se presentaron entre 1974 y 1983.

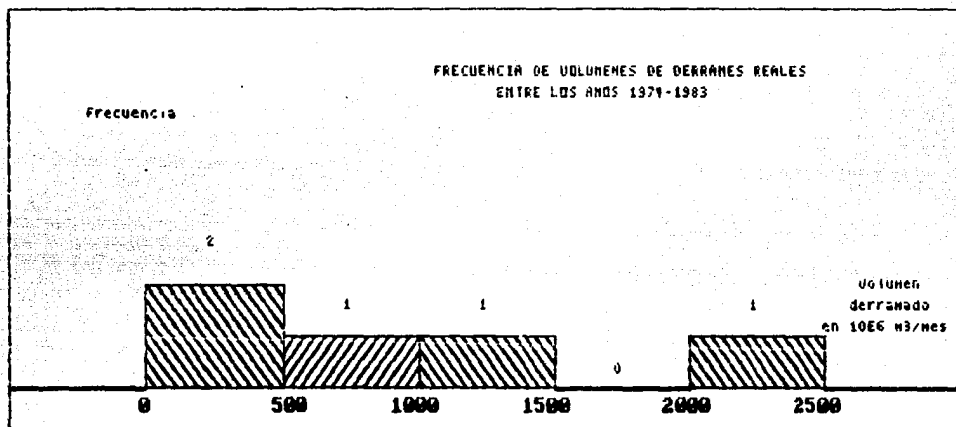


fig III.1.6.2

Con respecto a los derrames, la política real ha sido más conservadora, a pesar de que si se observa la figura III.1.6.1, la mayor frecuencia de volúmenes derramados ocurre entre 0.0 y 500.0 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> en un mes. De cualquier modo, con la política óptima propuesta no se tiene un volumen máximo derramado mucho mayor que con la real, ni la frecuencia de los derrames altos es significativamente diferente.

### III.2. SISTEMA LA ANGOSTURA - MALPASO.

#### III.2.1 Descripción del sistema La Angostura-Malpasso.

El sistema hidroeléctrico del río Grijalva está constituido por cuatro presas y sus correspondientes plantas hidroeléctricas. Las presas son, partiendo de aguas arriba, La Angostura, Chicoasén, Netzahualcóyotl (Malpasso) y Peñitas .

La cortina de La Angostura se ubica a 55 Km. al SE de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez y fue construida por la C.F.E. durante los años de 1969 a 1974. La presa Netzahualcóyotl fue construida por la S.R.H. durante los años de 1959 a 1964 en la boquilla de Raudales de Malpasso sobre el río Grijalva en el estado de Chiapas. La C.F.E. construyó la planta hidroeléctrica Malpasso de tipo subterránea.

Para efectuar la optimización del sistema se consideró que la planta de Chicoasén y Peñitas turbinan toda el agua que reciben sin funcionar como vasos reguladores.

Los detalles técnicos más importantes son:

	La Angostura	Malpasso
Capacidad total al NAME	18,500 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	12,960 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Capacidad útil	8,500 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	7,120 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Nivel máximo de embalse	539.50 m	188.00 m
Nivel normal (NAMO)	523.60 m	176.00 m
Nivel mínimo (NAMINO)	491.80 m	141.00 m
Altura máxima de la cortina	543.00 m	191.00 m
Obra de toma		
. Número	5	6
. Caudal de diseño	1,170 m <sup>3</sup> /s	1,530 m <sup>3</sup> /s
Casa de máquinas		
. turbinas	5 Francis	6 Francis
. Carga neta de diseño	91.50 m	85.00 m
. Caudal de diseño	218 m <sup>3</sup> /s	240 m <sup>3</sup> /s

### III.2.2 Descripción del programa.

Al igual que la optimización de la presa "El Infiernillo" , para el sistema La Angostura-Malpasso se utilizó un programa en TURBO-PASCAL , que puede ser ejecutado en cualquier P.C. compatible con I.B.M. .

El programa determina los niveles óptimos mensuales para cada presa que produzca el máximo beneficio al sistema durante un lapso.

El listado del programa, el diagrama de flujo, así como los datos de entrada al sistema se encuentran en el ANEXO 2 .

Para la optimización del sistema La Angostura-Malpasso, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- . Se efectuó el proceso de optimización durante 33 años, desde 1952 a 1984.
- . Durante este período se tomaron registros mensuales de escurrimiento por cuenca propia, medidos en los lugares donde se localizan actualmente las presas.
- . Para ambas presas se efectuaron 12 divisiones entre el NAMINO y el NAMO que corresponden a volúmenes iguales. A cada una de estas divisiones le corresponde un nivel de superficie libre y un volumen almacenado tal y como se muestra en la figura III.2.1 .
- . Se observó que en la operación real de las presas, el NAMO que se presenta en los folletos de información (ver referencias 9 y 10) no corresponde a la realidad, por lo tanto se efectuó un nuevo cálculo para determinar los nuevos NAMOs (ver apéndice 1) .
- . La apertura de compuertas, y por lo tanto los derrames comienzan cuando el agua alcanza el NAMO .

Las restricciones preliminares al programa son:

- . El gasto máximo de extracción por las turbinas es de  $2,426 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$  para La Angostura y  $3,732 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$  para Malpasso .
- . Existe un costo asociado al gasto derramado en cada período.
- . Se asocia un beneficio proporcional a la generación de energía eléctrica. En este caso se utiliza la misma función de beneficio para ambas presas, la cual es continua, y se obtuvo de trabajos preliminares efectuados en el Instituto de Ingeniería (ver referencia 5).

La Angostura

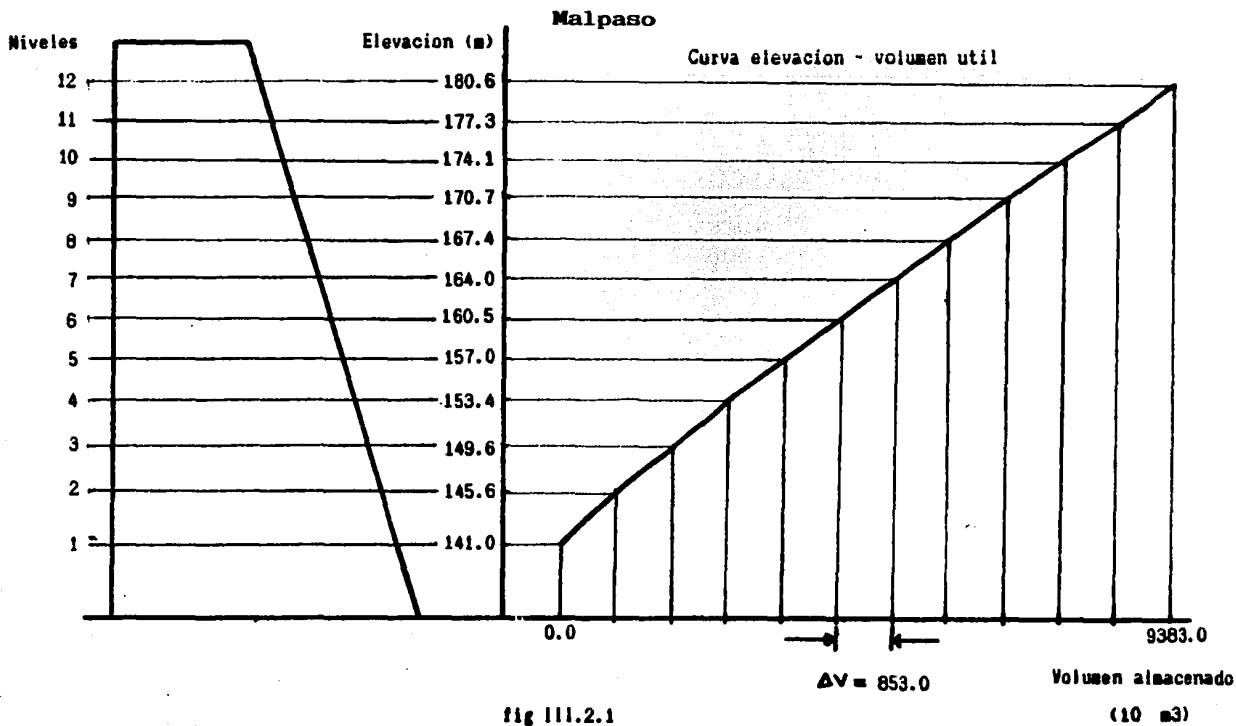
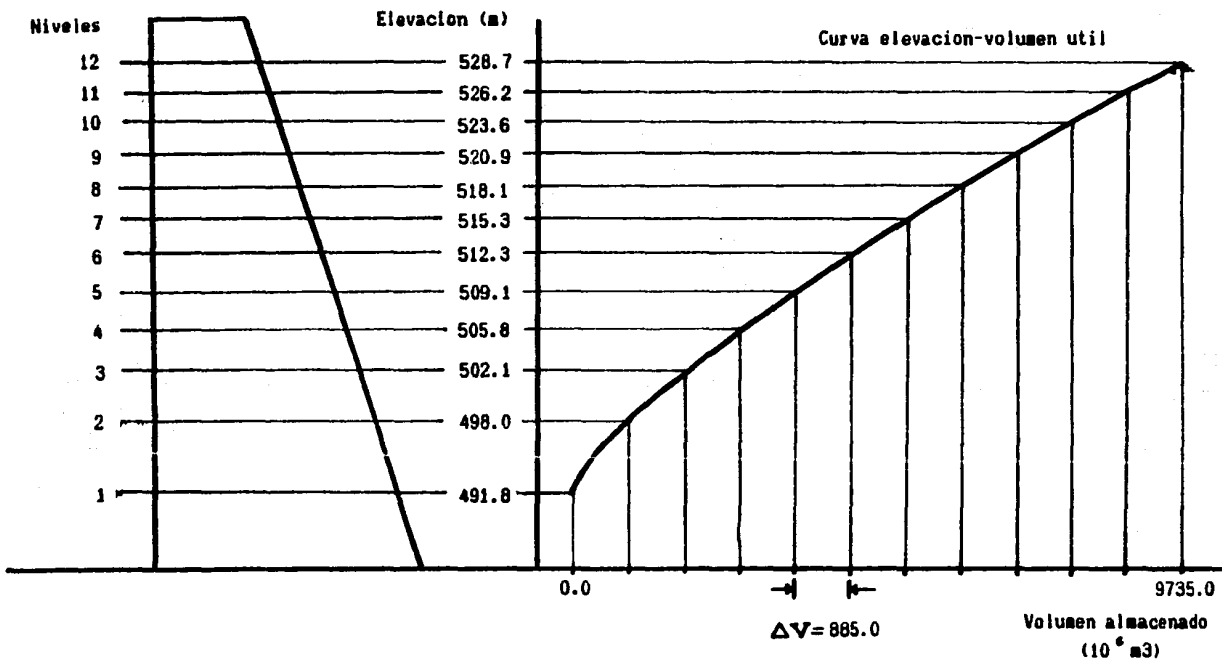


fig III.2.1



El programa optimiza la operación del sistema del presente al pasado, desde 1984 a 1952 . Este programa no es tan flexible como el utilizado en la presa El Infiernillo, dado que para obtener la política óptima dentro de cualquier intervalo de tiempo comprendido entre 1952-1984 hay que cambiar constantes en el programa.

En este programa no se utilizan restricciones para la época de lluvias, debido a que el algoritmo es ligeramente diferente al utilizado en El Infiernillo.

El procedimiento de optimación es el siguiente:

Supóngase que para un período  $t+1$ , fecha  $t+1$ , los niveles en las presas son 11 y 10 respectivamente ( ver figura III.2.2) . Entonces, existen 12 opciones en la presa 1 (sistema de La Angostura) para pasar de cualquier nivel en la fecha  $t$  al nivel 11 en la fecha  $t+1$ . Al igual que en el proceso de optimación del sistema El Infiernillo, dependiendo del gasto de entrada al vaso de La Angostura ( $ent(1, t+1)$ ) en el período  $t+1$  el conjunto de posibles soluciones se ve reducido. Para cada posible solución en el período  $t+1$  ( $ps(i, t+1)$ ), donde  $i \leq 12$  , existe un gasto de extracción asociado a cada solución ( $ext(i, t+1)$ ), donde  $0 \leq ext(i, t+1) \leq$  gasto máximo de extracción.

Por ejemplo, el  $i=3$  significa que solamente existen 3 niveles en la fecha  $t$  a partir de los cuales se puede pasar al nivel 11 (nivel en la fecha  $t+1$ ) (ver figura III.2.3) . Esto implica que existen tres gastos de extracción posibles del sistema La Angostura.

Entonces como gasto de entrada al sistema Malpaso en el período  $t+1$  se tiene

$$ent(2, i, t+1) = e(2, t+1) + ext(i, t+1) \quad (III.2.1)$$

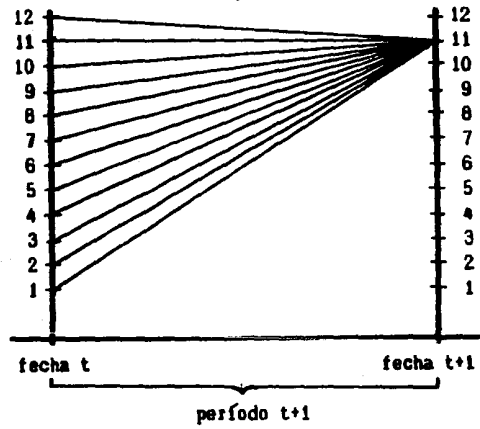
donde

$ent(2, i, t+1)$	= entrada total a Malpaso en el período $t+1$ .
$e(2, t+1)$	= entrada por cuenca propia a Malpaso.
$ext(i, t+1)$	= gasto de extracción en La Angostura para la opción $i$ en el período $t+1$ .

En este período  $i=1,2,3$  , pero en general  $i=1,2,\dots,ps$  ,  $ps \leq 12$  . El número 2 que aparece en la ecuación (III.2.1) se refiere a la segunda

SISTEMA LA ANGOSTURA  
(presa 1)

ent  $\{1, t+1\}$



SISTEMA MALPASO  
(presa 2)

ent  $\{2, 1, t+1\}$

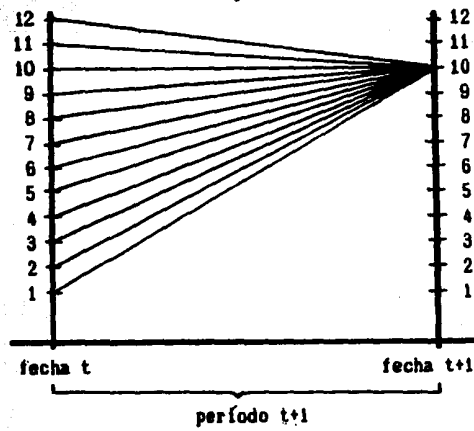
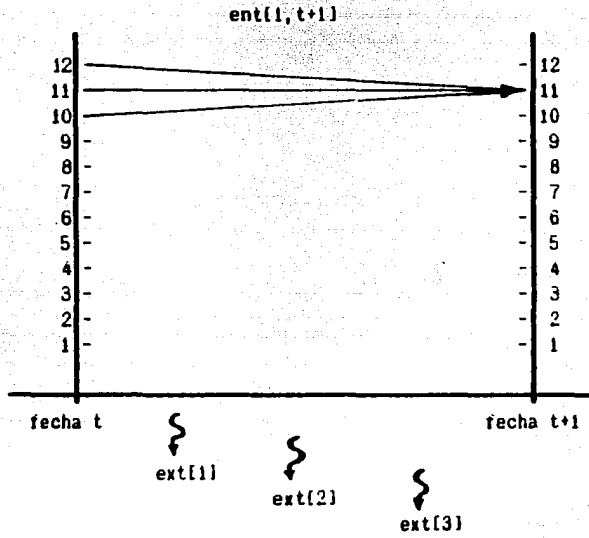


fig III.2.2

SISTEMA LA ANGOSTURA

=====



SISTEMA MALPASO

=====

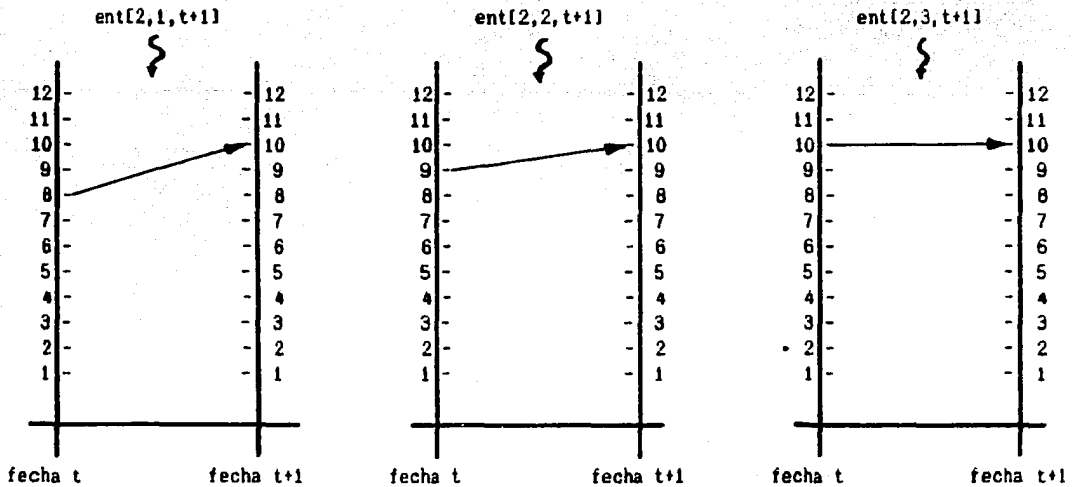


fig III.2.3

presa. Cabe señalar que ext puede estar conformado por gasto turbinado más derrames.

Para cada posible entrada al sistema Malpaso se efectúa un análisis similar a El Infiernillo para encontrar la mejor decisión. En la figura III.2.3 se observa a manera de ejemplo que para cada entrada existe un nivel óptimo. Para cada decisión óptima en Malpaso se tiene un beneficio asociado. Para cada gasto de extracción en La Angostura se tiene también un beneficio asociado, por lo tanto se cuenta con 3 pares de beneficios.

Suponiendo que los beneficios asociados son los mostrados en la tabla III.2.1, se observa que la mejor decisión para la fecha t es el nivel 8 en el sistema Malpaso, dado que la suma de beneficios es la máxima, independientemente si el beneficio local en el sistema Malpaso es el menor.

Se efectúa el mismo procedimiento para el período t teniendo como niveles en la fecha t los escogidos anteriormente, (12 y 18). El beneficio se acumula al que se ha acumulado desde la fecha inicial del análisis.

Sistema La Angostura		Sistema Malpaso		Sistema La Angostura-Malpaso
Decisión	Beneficio	Decisión	beneficio	Suma de beneficios
12-11	45	8-10	38	45+38=83
11-11	37	9-10	43	37+43=80
10-11	25	10-10	51	25+51=76

tabla III.2.1

Las funciones utilizadas en el programa son las siguientes:

. Función objetivo

A partir de la ecuación (II.1.9) se tiene que

$$\beta = \int_0^T [g_1 (G_1) - h_1 (D_1)] dt + \int_0^T [g_2 (G_2) - h_2 (D_2)] dt \quad (\text{III.2.2})$$

dado que  $h_1 = h_2 = h$ , y  $h$  es una función lineal, entonces :

$$h_1 (D_1) + h_2 (D_2) = h (D_1 + D_2) \quad (\text{III.2.3})$$

por lo tanto la ecuación (III.2.2) queda

$$\beta = \int_0^T [g_1 (G_1) + g_2 (G_2) - h (D_1 + D_2)] dt \quad (\text{III.2.4})$$

donde  $g$  es la función de beneficio y  $h$  la función de costos por derrames .  $G_1$  es la generación de energía en la presa 1 y  $D_1$  es el volumen de derramado en la presa 1,  $G_2$  y  $D_2$  se refieren a la presa 2, siendo La Angostura la presa 1 .

. Función de beneficios

La Angostura:

$$g_1 = 0.0105 P_1^{1.051} \quad (\text{III.2.5})$$

donde  $P_1$  es la energía mensual generada en el sistema La Angostura en MWh y  $g_1$  es el beneficio asociado en millones de pesos (ver referencia 5) .

Malpaso:

$$g_2 = 0.0090 P_2^{1.064} \quad (\text{III.2.6})$$

donde  $P_2$  es la energía mensual generada en el sistema Malpaso en MWh y  $g_2$  es el beneficio asociado en millones de pesos (ver referencia 5) .

. **Función de beneficios**

**La Angostura:**

$$g_1 = 0.0105 P_1^{1.051} \quad (\text{III.2.6})$$

**Malpaso:**

$$g_2 = 0.0090 P_2^{1.064} \quad (\text{III.2.7})$$

donde  $P_1$  es la energía mensual generada en La Angostura en MWh y  $g_1$  es el beneficio asociado en millones de pesos, en forma similar  $P_2$  y  $g_2$  para Malpaso (ver referencia 5).

. **Función de energía**

**La Angostura:**

$$P_1 = (\text{elev\_prom} [1] - \text{nivturb} [1]) \times \text{alfa} [1] \times \text{qq} [1] \quad (\text{III.2.8})$$

**Malpaso:**

$$P_2 = (\text{elev\_prom} [2] - \text{nivturb} [2]) \times \text{alfa} [2] \times \text{qq} [2] \quad (\text{III.2.9})$$

donde  $\text{elev\_prom}$  es la elevación promedio mensual en metros (ver ecuación II.2.2.10) ;  $\text{nivturb}$  es la elevación de las turbinas también en metros ;  $\text{alfa}$  es una constante de conversión de unidades que también toma en cuenta la eficiencia del sistema.

. **Función de costos por derrames**

Dado que no se encontró información acerca de costos asociados a volúmenes derramados por los vertedores de ambas presas, se propuso una ecuación lineal del tipo  $y=bx$ , donde  $x$  es el volumen derramado, y el costo asociado  $y$  y  $b$  una constante .

El valor de  $b$  se obtuvo de la siguiente forma:

Inicialmente se propuso un valor de  $b=100$  para ambas presas, considerando que el daño por derrames era muchísimo mayor que el beneficio que se produciría si esa agua fuera turbinada, por lo tanto, como primera aproximación se supuso, arbitrariamente, un valor de 1:10,000 para la relación beneficio-costos. Para el sistema de La Angostura se mantuvo fijo en  $b=100$  y para Malpaso se varió desde  $b=0$  a  $b=100$ . Los resultados se observan en la tabla III.2.2 donde el beneficio total del sistema es para un lapso de 33 años, variando la función de costos por derrames en Malpaso, que es donde se presenta mayor frecuencia de derrames.

Función de castigo en La Angostura $y = bx$	Función de castigo en Malpaso $y = bx$	Beneficio total
$y = 100x$	$y = 100x$	5'401,460.6
$y = 100x$	$y = 10x$	5'461,135.8
$y = 100x$	$y = 0x$	5'468,873.2

tabla III.2.2

Se observa que no existe mucha diferencia en el beneficio total al utilizar diversos valores para la constante  $b$ , por lo tanto se decidió utilizar la siguiente ecuación para ambas presas

$$h = 100 \times \text{derram} \quad (\text{III.2.10})$$

donde  $\text{derram}$  es el volumen mensual derramado en cualquiera de las presas en  $10^6 \text{ m}^3$  y  $h$  es la función de costos asociados al volumen derramado en millones de pesos . . .

**. Función elevaciones- volúmenes .**

Las curvas de elevaciones-volúmenes están descritas por las siguientes funciones (ver referencia 5) :

La Angostura:

$$H = 491.8 + 0.038700 V^{0.7470} \quad (\text{III.2.11})$$

Malpaso:

$$H = 141.0 + 0.010946 V^{0.8957} \quad (\text{III.2.12})$$

donde V es el volumen útil en  $10^6 \text{ m}^3$  y H es la elevación en metros .



### III.2.3 Resultados.

#### Presentación de datos.

La presentación de datos es de manera similar al programa de optimación para El Infiernillo (ver capítulo III.1). El usuario puede escoger entre imprimir los resultados en una impresora, o bien mostrarlos en pantalla. Primero se presentan los resultados para La Angostura, después para Malpaso, y al final se encuentra el beneficio acumulado para el sistema en su conjunto.

#### Análisis de resultados.

Se efectuó una corrida para el sistema La Angostura - Malpaso entre los años de 1952 y 1984 . La frecuencia relativa de niveles óptimos se muestra en las tablas III.2.3a y III.2.3b , así como la media y la desviación estándar para cada mes.

#### LA ANGOSTURA

mes	ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
nivel												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8							3	3				
9						3	3	6	3			
10						9	15	12	18			
11					3	9	24	27	30	18		
12	100	100	100	100	97	79	55	52	49	82	100	100
$\bar{X}$	12.00	12.00	12.00	12.00	11.97	11.64	11.24	11.18	11.24	11.82	12.00	12.00
$\bar{\sigma}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.174	0.783	1.032	1.074	0.867	0.392	0.000	0.000

tabla III 2.3.a

## MALPASO

mes	ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
nivel												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7							3					
8								3	3			
9						3		3	12			
10							6	3	3	6		
11						3	6	15	27	12		
12	100	100	100	100	100	94	85	76	55	82	100	100
$\bar{x}$	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	11.88	11.67	11.58	11.18	11.76	12.00	12.00
$\bar{\sigma}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.545	0.989	0.936	1.158	0.561	0.000	0.000

tabla III.2.3.b

A partir de los resultados que se observan en las tablas III.2.3a y III.2.3b se propone un criterio para determinar niveles mensuales óptimos de operación.

El nivel mensual óptimo de operación será :

$$\text{nivel} = \text{parte entera} ( \bar{x} - \bar{\sigma} - c ) \quad (\text{III.2.3.1})$$

$$c = 0 \quad \text{si } \bar{\sigma} < 1.00$$

$$c = 1 \quad \text{si } \bar{\sigma} \geq 1.00$$

donde  $\bar{x}$  es el nivel mensual promedio,  $\bar{\sigma}$  es la desviación estandar de niveles para el mismo mes y  $c$  es una constante arbitraria que se utiliza para trabajar en un rango de mayor seguridad en las presas.

A partir del criterio enunciado anteriormente, se proponen los niveles mensuales óptimos de operación para cada presa (ver tabla III.2.4) .

		NIVELES MENSUALES OPTIMOS PARA EL SISTEMA LA ANGOSTURA - MALPASO											
PRESA	MES	ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
LA ANGOSTURA		12	12	12	12	11	10	9	9	10	11	12	12
MALPASO		12	12	12	12	12	11	10	10	9	11	12	12

tabla III.2.4

A partir de los niveles óptimos de la tabla III.2.4 se corrió un programa de simulación para probar la política óptima entre los años 1952 y 1984 . Posteriormente se efectúan algunos cambios de niveles en el programa a la política óptima para observar si existe alguna política que produzca un beneficio mayor a la política propuesta. En la tabla III.2.5 se muestran los resultados para diversas corridas de prueba.

Se analiza también el número de veces en que la política no puede ser seguida, esto es, las ocasiones en que la entrada al vaso no alcanza para que el nivel de la superficie libre del agua suba hasta el nivel que indica la política (ver tabla III.2.6) .

FRECUENCIA DE DISCONTINUIDADES			
Corrida #	La Angostura	Malpaso	Total
1	1	6	7
2	1	6	7
3	1	6	7
4	1	6	7
5	1	6	7
6	1	6	7
7	1	6	7
8	6	8	14

tabla III.2.6

Corrida	LA ANGOSTURA												MALPASO												Beneficio para el sistema		
	ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Beneficio	ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV		DIC	Beneficio
1	12	12	12	12	11	10	9	9	10	11	12	12	1'960,301.7	12	12	12	12	12	11	10	10	9	11	12	12	3'640,748.9	5'601,056.9
2	12	12	12	12	11	10	9	9	10	11	12	12	1'960,301.7	12	12	12	12	12	11	10	10	9	10	12	12	3'590,981.3	5'551,283.0
3	12	12	12	12	11	10	9	9	10	11	12	12	1'960,301.7	12	12	12	12	12	11	10	9	9	11	12	12	3'420,922.4	5'381,224.1
4	12	12	12	12	11	10	9	9	10	11	12	12	1'960,301.7	12	12	12	12	12	10	10	10	9	11	12	12	3'511,003.3	5'511,003.3
5	12	12	12	12	12	10	9	9	10	11	12	12	1'971,482.1	12	12	12	12	12	11	10	10	9	11	12	12	3'654,504.1	5'625,986.2
6	12	12	12	12	12	10	9	9	10	11	12	12	1'971,482.1	12	12	12	12	12	10	10	10	9	11	12	12	3'511,306.1	5'482,788.2
7	12	12	12	12	12	11	9	9	10	11	12	12	1'937,495.5	12	12	12	12	12	11	10	10	9	11	12	12	3'574,499.6	5'512,445.1
8	12	12	12	12	12	10	9	9	10	11	12	12	1'977,702.1	12	12	12	12	12	11	10	10	9	11	12	12	3'705,672.9	5'683,375.0

tabla III.2.5

Se puede apreciar de las tablas III.2.5 y III.2.6 que la corrida #5 es la óptima dado que el beneficio total acumulado es el más alto de las corridas que presentan el menor número de discontinuidades en los 33 años de análisis.

En la tabla III.2.7 se comparan la política propuesta y la política escogida. Se observa que cambiando el nivel en el mes de mayo en La Angostura a uno superior al propuesto, se obtiene un beneficio mayor.

		COMPARACION ENTRE LA POLITICA OPTIMA PROPUESTA Y LA POLITICA ESCOGIDA												
		ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Beneficio acumulado
LA ANGOSTURA	propuesta	12	12	12	12	11	10	9	9	10	11	12	12	1'960,301.7
	escogida	12	12	12	12	12	11	10	10	9	11	12	12	1'971,482.1
MALPASO	propuesta	12	12	12	12	11	10	9	9	10	11	12	12	3'640,748.9
	escogida	12	12	12	12	12	11	10	10	9	11	12	12	3'654,504.1

Beneficio máximo acumulado para el sistema La Angostura - Malpaso	
Política propuesta	5'601,056.9
Política escogida	5'625,986.2

tabla III.2.7

Cabe señalar que estrictamente hablando, existe una sola política óptima para el sistema, esta política óptima es la política escogida, la cual tiene una variación de beneficios totales acumulados del 0.01% con respecto a la política propuesta. A partir de la simulación de la política óptima (corrida #5) se efectúa un análisis estadístico para observar los volúmenes derramados. En la tabla III.2.8 se muestran los volúmenes totales derramados en cada presa durante los años 1952-1984 .

## VOLUMEN TOTAL DERRAMADO UTILIZANDO LA POLITICA OPTIMA

SISTEMA	VOLUMEN TOTAL DERRAMADO ( $m^3 10^6$ )
LA ANGOSTURA	2,055.3
MALPASO	10,435.9

tabla III.2.8

La Angostura derrama solamente en 3 ocasiones en un lapso de 33 años y todas en el mes de septiembre, mientras que en Malpaso se producen derrames en 18 ocasiones. El promedio de volumen mensual derramado en Malpaso es de  $579.78 \times 10^6 m^3$  cada vez que esto ocurre.

La distribución de derrames por meses en Malpaso se observa en la figura III.2.4 .

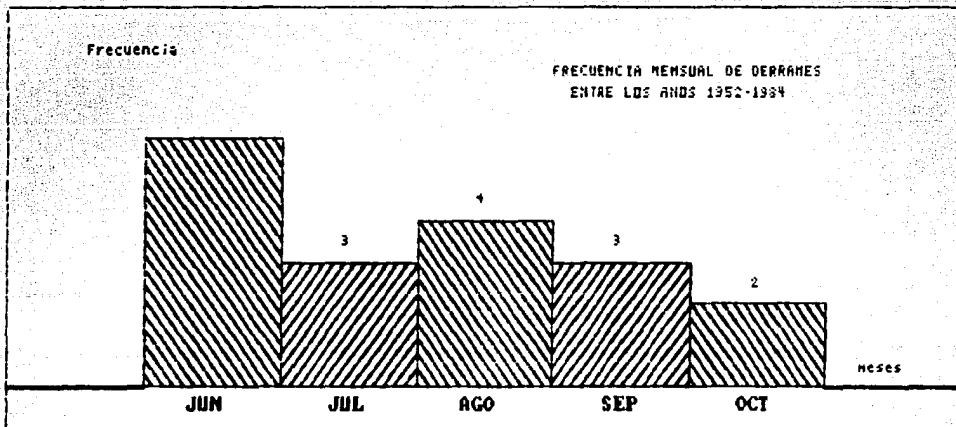


fig III.2.4

En la figura III.2.5 se observa la frecuencia de volúmenes derramados en Malpaso en las 18 ocasiones que esto ocurre.

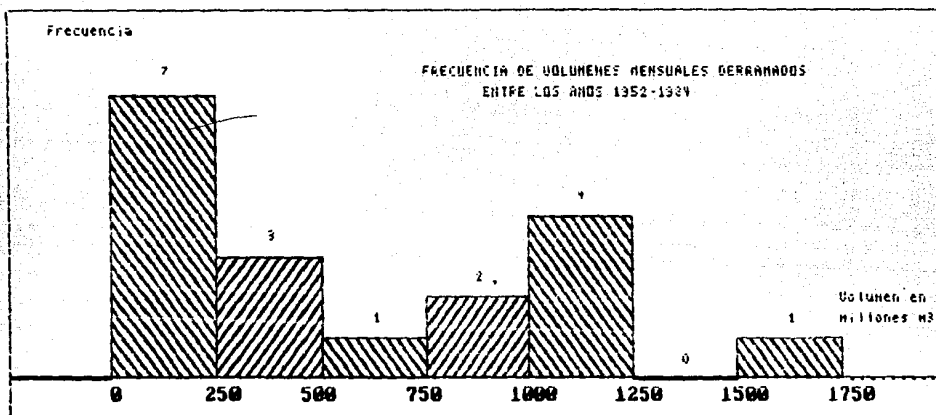


fig III.2.5

La imposibilidad para pasar de cualquier nivel en una fecha  $t$  a un nivel  $i$  en la fecha  $t+1$  produce una discontinuidad en el proceso de simulación (ver subcapítulo III.1.3) .

En el programa que simula la política óptima estas discontinuidades se presentan bastante espaciadas en el tiempo como para efectuar algún cambio a la política o al programa . En la tabla III.2.9 se observan los periodos en que se presentan estas discontinuidades, siendo el período 1 el mes de enero del año 1952, el período 2 el mes de febrero del mismo año, y así hasta el período 396 que corresponde al mes de diciembre de 1984 .

Periodos en que se presenta discontinuidad en la simulación de la política óptima	
LA ANGOSTURA	272
MALPASO	93, 117, 169, 249, 297, 309

tabla III.2.9

### III.2.4 Comparación de resultados con la operación real del sistema.

Para comparar resultados se efectuó una simulación del sistema con la política real de operación entre los años 1981 y 1984 . En la figura III.2.6a se observa la política mensual real seguida y la política óptima para la presa de La Angostura, se observa lo mismo en la figura III.2.6b , pero para Malpaso.

En la figura III.2.7 se muestran los beneficios anuales para el sistema con la política real seguida y con la política óptima .

En la figura III.2.8 se muestra una comparación entre volúmenes anuales derramados realmente y los volúmenes que se hubieran derramado al seguir la política óptima propuesta .

Finalmente, en la tabla III.2.10 se muestran los beneficios totales acumulados para los 4 años de operación .

Beneficio acumulado durante 1981 - 1984 en millones de pesos			
	La Angostura	Malpaso	Total
Operación real del sistema	253,702.0	182,265.2	435,967.3
Política óptima determinista	283,934.1	466,348.7	750,282.8

tabla III.2.10

Se aprecia que los beneficios para La Angostura son muy similares, pero los beneficios acumulados para Malpaso son un 250% mayores con la política óptima que con la real .



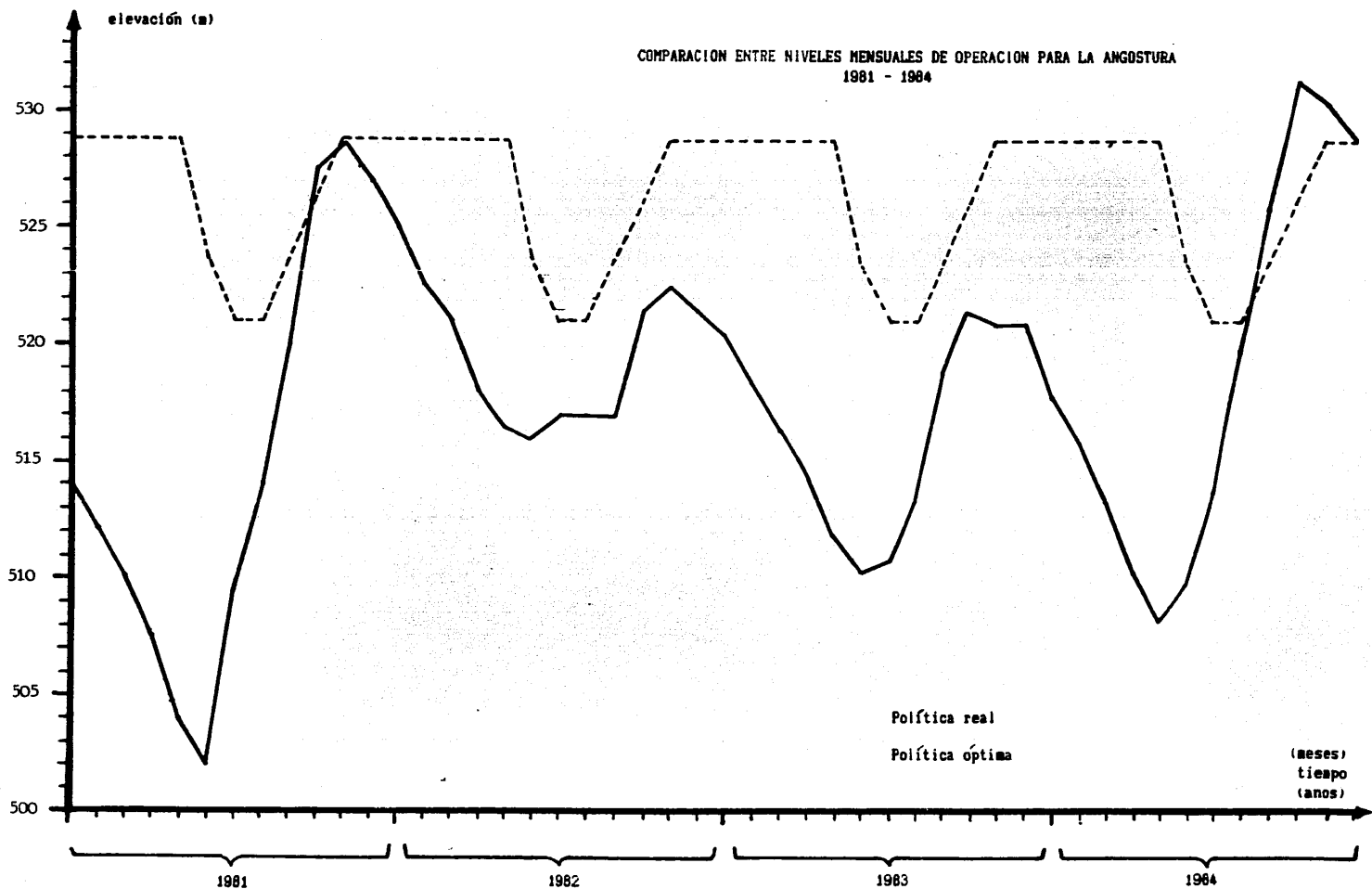


fig 111.2.6.a

COMPARACION ENTRE NIVELES MENSUALES DE OPERACION PARA MALPASO  
1981 - 1984

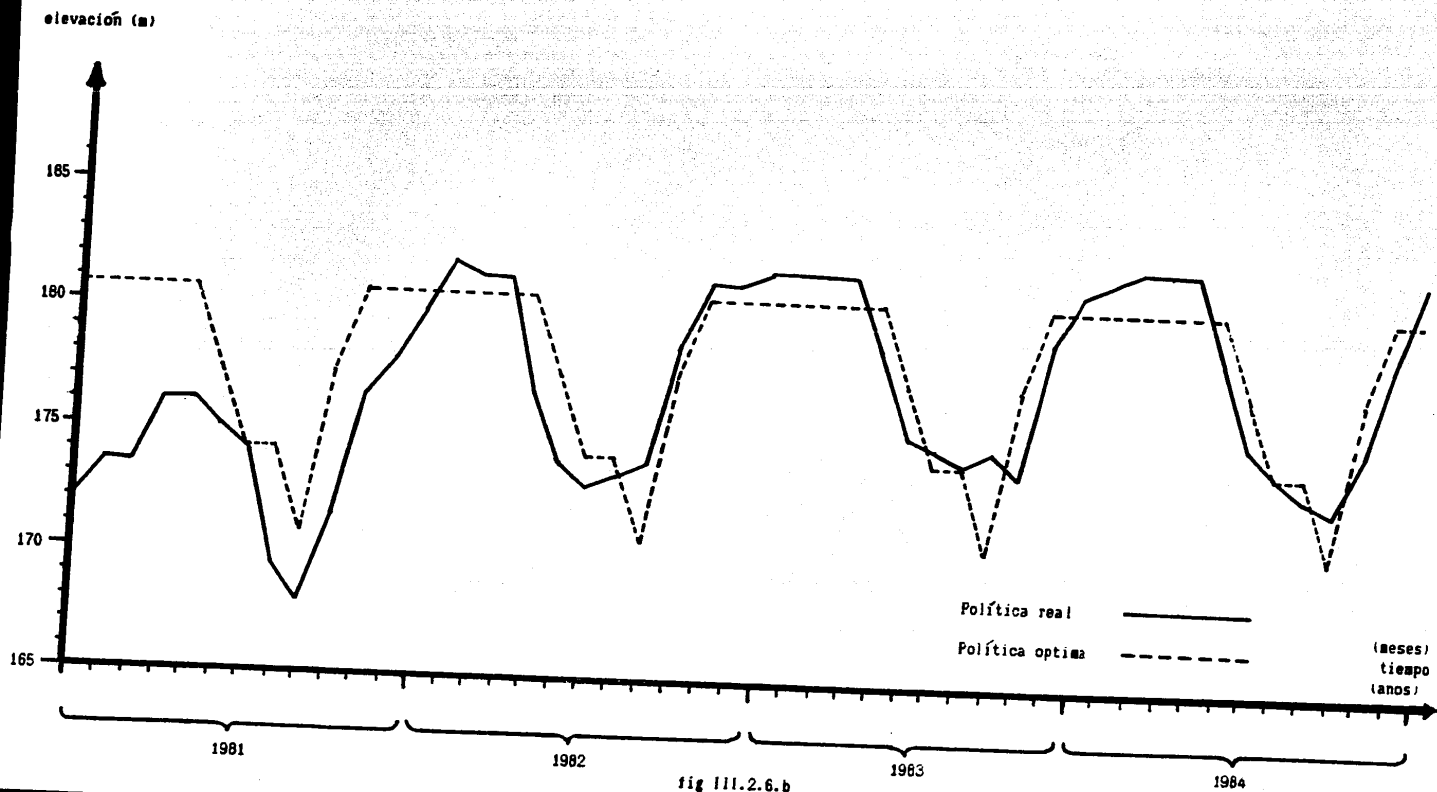


fig III.2.6.b

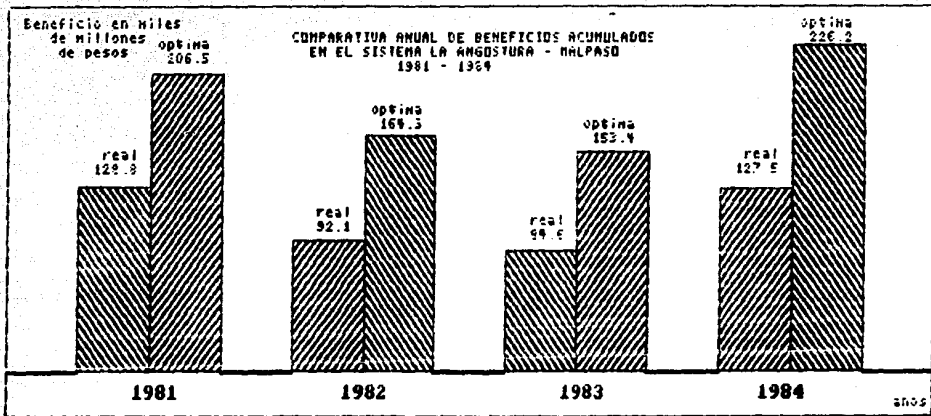


fig III.2.7

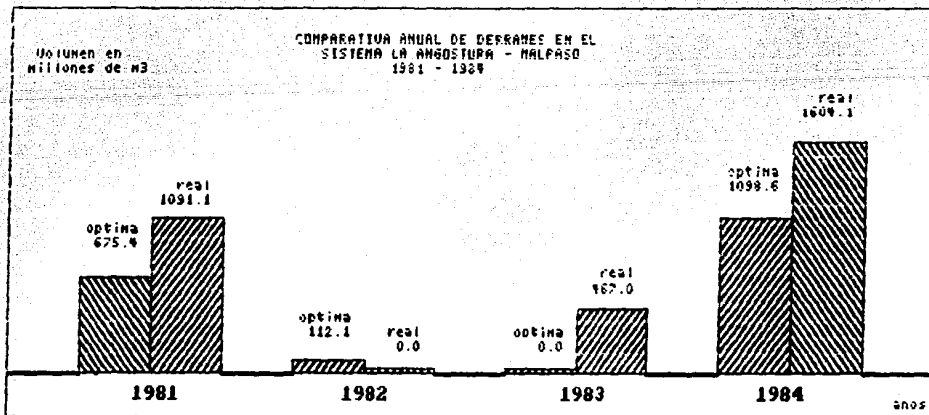


fig III.2.8

### III.2.5 Comparación con una política obtenida con programación dinámica estocástica.

Se efectuó una comparación con la política óptima determinada mediante la programación dinámica estocástica (ver referencia 5) para el sistema La Angostura-Malpasso. Se diseñó un programa en TURBO-PASCAL que simula la política óptima estocástica, tomando en cuenta las mismas funciones y restricciones que se utilizan para simular la política óptima determinista.

En la tabla III.2.11 se muestran los beneficios acumulados para 33 años de operación, 1952-1984.

	Beneficio acumulado
Política estocástica	5'676,176.2
Política determinista	5'625,986.2

tabla III.2.11

En la tabla III.2.12 se muestra una comparación entre los volúmenes totales derramados en cada presa durante 33 años de simulación dependiendo de la política de operación utilizada.

Volúmenes derramados en el sistema La Angostura - Malpasso en millones de m <sup>3</sup>			
	La Angostura	Malpasso	Total
Política estocástica	307.6	2,777.8	3,085.4
Política determinista	2,055.3	10,435.9	12,491.2

tabla III.2.12

A pesar de tener un beneficio mayor y menor volumen derramado la política de operación basada en la programación dinámica estocástica presenta un funcionamiento muy discontinuo, esto es, de los 396 periodos en que se analiza el funcionamiento del sistema, 151 veces no turbina,

(gasto de extracción = 0) en La Angostura, y 181 veces en Malpaso. El programa escoge una política de operación que consiste en no extraer agua de las presas hasta que el volumen es lo suficientemente grande como para turbinar con el gasto máximo de extracción.

En la figura III.2.9 se muestra la frecuencia relativa para cada presa del sistema en que se turbinar con el gasto máximo de extracción, un gasto intermedio y gasto igual a cero, utilizando la política obtenida mediante la programación dinámica estocástica.

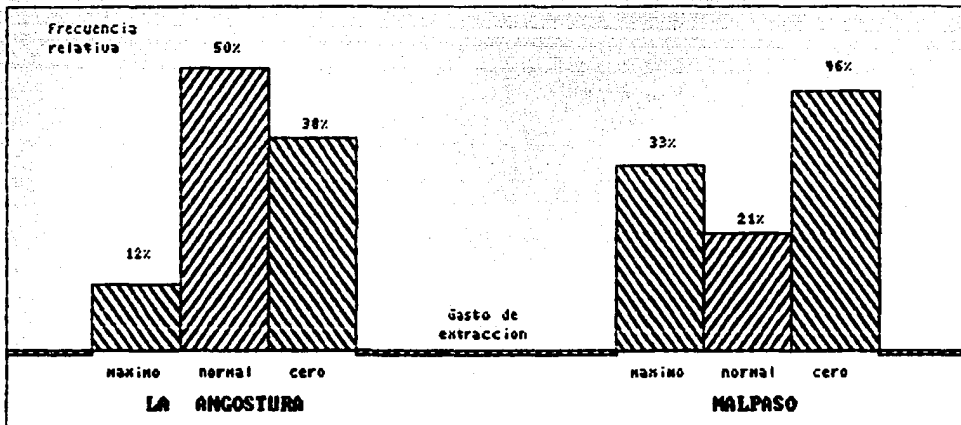


fig III.2.9

Para la política óptima determinística los resultados se muestran en la figura III.2.10.

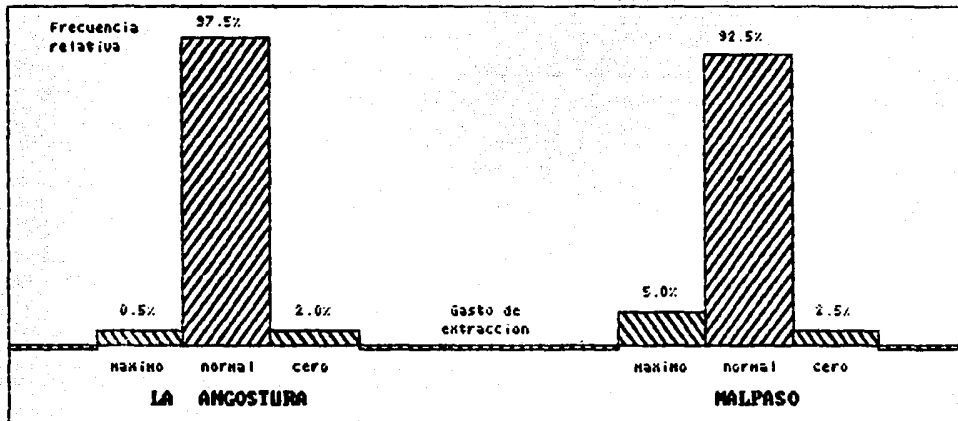


fig III.2.10

#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La programación dinámica determinista es una herramienta de análisis muy útil para establecer políticas de operación de plantas hidroeléctricas. Los resultados obtenidos al comparar el método con otros enfoques más generales, como lo es la programación dinámica estocástica, son similares en cuanto a la magnitud de los beneficios, pero cabe resaltar que la aplicación del método expuesto en este trabajo es considerablemente más simple y los tiempos de procesamiento menores.

Lo anterior tiene especial importancia debido a que la capacidad de las computadoras requerida para resolver un problema haciendo uso del algoritmo determinista es mucho menor que aquella necesaria si se emplea el enfoque estocástico, lo que se confirma con el hecho de que para el análisis del sistema La Angostura-Malpaso fue suficiente hacer uso de una microcomputadora del tipo personal, mientras que para el mismo sistema analizado desde el punto de vista estocástico fue indispensable recurrir al empleo de una macrocomputadora (ver referencia 5).

Por otra parte, los resultados del análisis aquí expuesto demostraron producir beneficios mayores que los obtenidos con las políticas reales empleadas en ambos sistemas (Infiernillo, La Angostura-Malpaso).

Una ventaja adicional de este método es que define las regiones de soluciones factibles donde pueden aplicarse métodos más complejos de optimación. En el caso de los ejemplos desarrollados se puede apreciar cuáles son los meses donde no es necesario efectuar un análisis más profundo (de noviembre hasta abril).

Una ventaja particular del enfoque aquí presentado es que éste asegura la continuidad en el proceso de optimación bajo un criterio de máxima seguridad (evitando los derrames).

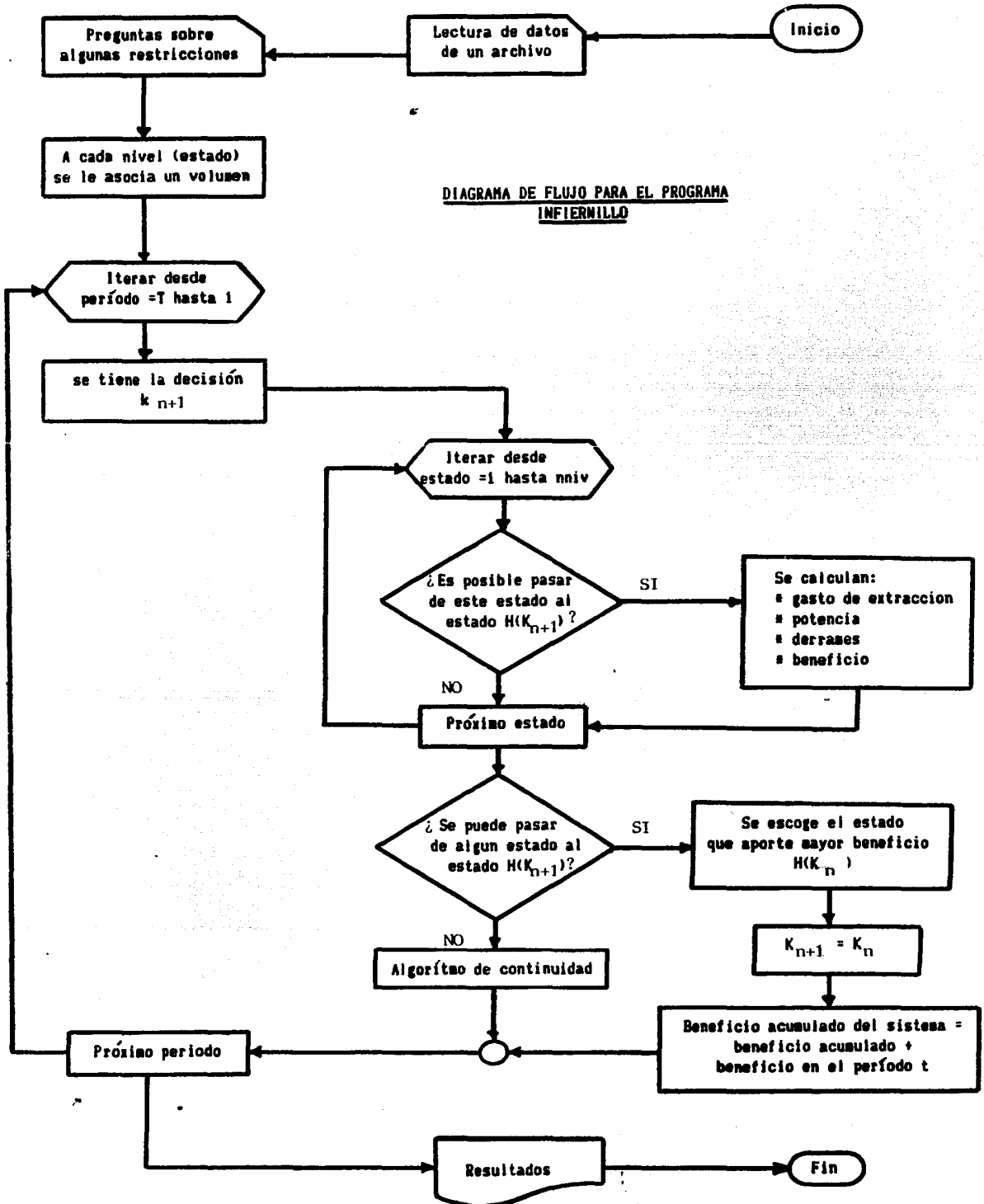
Por último, son intenciones de este trabajo, proporcionar un procedimiento de optimación simple y accesible a aquellos organismos que no disponen de los recursos necesarios para efectuar un análisis más sofisticado y complejo,

así como sentar las bases para futuras aportaciones que permitan el desarrollo de un modelo de optimización para grandes sistemas, como es el caso del sistema nacional eléctrico interconectado .

C



## ANEXO 1



## PROGRAM INFIERNILLO;

(programa que determina la politica de operacion para la presa El Infiernillo mediante la programacion dinamica determinista)

## CONST (constantes globales)

```

nped=588;      delvol=788;      zero=-1E20;      level=10;
qmax=2838;     beta=2.45;       wo=1650;         nivturb=49.5;
namo=169;      namino=140;      nmax=589;

```

## VAR (variables globales)

```

mes:array[1..12] of string [4];
ee,gasto,derrame,potencia,suma,e,ni,vo,max:array[1..nmax] of real;
aa,politica:array[1..nmax] of integer;
extraccion,dd,pot,b,v,n:array[1..level] of real;
ganancia,benef,p,d,gasto_ext,vol_pos,cd,elev_proa:real;
nniv,pp,l,j,k,y,final,inicio,primer:integer;
ext,adela,mat,mati,matil,matild:real;
v,kx,nivnamo,ano_inicial,ano_final,mes_inicial,mes_final,ano:integer;
a,archivo:text;
entrada:real;

```

## PROCEDURE ASIGNACION;

```

BEGIN
  mes[1]:='ENE';      mes[2]:='FEB';      mes[3]:='NZO';      mes[4]:='ABR';
  mes[5]:='MAY';      mes[6]:='JUN';      mes[7]:='JUL';      mes[8]:='AGO';
  mes[9]:='SEP';      mes[10]:='OCT';      mes[11]:='NOV';      mes[12]:='DIC';
END;

```

## PROCEDURE IMPRESION; (el usuario escoge donde quiere impreso los resultados)

```

var r:char;
BEGIN
  writeLn('impresion en (p)antalla o (i)mpresora?');
  readLn(r);
  if r = 'i' then assign(a,'LST:');
  else assign(a,'CON:');
  writeLn(a,115);
END;

```

## PROCEDURE LEE\_ARCH; (se leen los datos de escurrimiento de un archivo llamado MARIA)

```

var y:integer;
BEGIN
  assign(archivo,'maria.dat');
  reset(archivo);
  for y := 1 to nped do
    BEGIN
      read(archivo,entrada);
      e[y]:=entrada;
    END;
  readLn(archivo);
  close(archivo);
END;

```

PROCEDURE VOLUMENES; (curva elevacion-volumenes)

var x:integer; tr,ty:real;

BEGIN

writeIn(a,' OPTIMACION SISTEMA PRESA EL INFIERNILLO');

writeIn(a,' ');

for x:=1 to level do

BEGIN

v(x):=((x-1)\*delvol)+2250;

tr:=10000+(12.8\*(v(x)-2250));

n(x):=126.667\*(sqrt(tr)/7.5);

write(a,' nivel',x:2,')= ',n(x):6:2);

writeIn(a,' volumen',x:2,')= ',v(x):7:2);

END;

END;

PROCEDURE PREGUNTA; (se pregunta el nivel maximo en epoca de lluvias)

BEGIN

writeIn(' PREGUNTAS');

write(' Ano de final=');readIn(ano\_inicial);

write(' Ano inicio= ');readIn(ano\_final);

write(' Mes final (en numero)='); readIn(mes\_inicial);

write(' Mes inicial='); readIn(mes\_final);

write(' Nivel maximo en lluvias='); readIn(nivnamo);writeIn(' ');

if (mes\_inicial>4) and (mes\_inicial<11) then BEGIN

nniv:=nivnamo;

writeIn(' estoy en epoca de lluvias,nivel maximo=',nivnamo);

END

else BEGIN

nniv:=nivnamo;

writeIn(' estoy en epoca de estiaje,nivel maximo=',level);

END;

write(' nivel inicial='); readIn(primer);writeIn(' ');

END;

FUNCTION COSTO(p:real):real; (beneficio asociado a la generacion de energia electrica mensual)

var cost,cc,ss:real;

BEGIN

cc:=7E4; ss:=35E4;

if p<cc then cost:=((p/80.738)-600);

if ((p)=cc) and (p<ss) then cost:=(0.003\*p);

if p>ss then cost:=((0.005\*p)+1085);

costo:=cost;

END;

PROCEDURE CASTIGO; (costo asociado a los danos causados por derrames)

var h,hl,hm,hn:real;

BEGIN

hn:=4.69697E4;

hl:=1.71875E4;

hm:=2.16255E5;

if d<2250 then h:=d/0.225;

if ((d)=2250) and (d<3900) then h:=(23.485\*d)-hn;

if d>3900 then h:=(66.54\*d)-hm;

cd:=h;

END;

PROCEDURE IMPOSIBLE; (subrutina que asigna valores a las variables cuando)

```
BEGIN
  (es imposible pasar de un nivel a otro)
  p:=0;
  gasto_ext:=0;
  benef:=zero;
  politicalj:=0;
END;
```

PROCEDURE TURBINAR; (subrutina que calcula la energia mensual)

```
BEGIN
  if d>0 then CASTIGO
    else cd:=0;
  p:=(elev_prom-nivturb)*gasto_ext*beta;
  ganancia:=costo(p);
  benef:=ganancia-cd;
END;
```

PROCEDURE BENEFICIO; (subrutina que efectua los calculos de energia )  
var dv,de,qp,abajo,arriba:real; (para todas las alternativas en cada periodo)

```
BEGIN
  for k:=1 to nniv do
    BEGIN
      elev_prom:=(ni[j]+nk)/2;
      dv:=(i-k)*delvol;
      gasto_ext:=eefj]-dv;
      if gasto_ext<0 then gasto_ext:=0;
      d:=gasto_ext-qmax;
      if d<0 then de:=0
        else de:=d;
      if gasto_ext<qmax then qp:=gasto_ext
        else qp:=qmax;
      if((i<nniv) and (d>0)) then de:=0;
      if (i>k) and (i<nniv) then de:=0;
      vol_pos:=v[k]+eefj]-qp-de;
      abajo:=vol[j]-(delvol/2);
      arriba:=vol[j]+(delvol/2);
      dd[k]:=de;
      gasto_ext:=qp;
      if ((vol_pos)=abajo) and (vol_pos<arriba)) then TURBINAR
        else IMPOSIBLE;
      extraccion[k]:=gasto_ext;
      pot[k]:=p;
      b[k]:=benef;
    END;
  END;
```

PROCEDURE ESCOGER; {para cada periodo se escoge el nivel que produce el maximo beneficio}  
var z:integer; za,zb:real;

BEGIN

max[j]:=b[1]; pp:=1;

for z:=2 to nniv do

BEGIN

if b[z] >= max[j] then BEGIN

max[j]:=b[z];

pp:=z;

END;

END;

gastof[j]:=extraccionf[pp]; derramef[j]:=dd[pp]; potencial[j]:=pot[pp];

zb:=0;

{se comprueba de que exista}

for z:=1 to nniv do

{continuidad en el tiempo}

BEGIN

za:=max[j] - b[z];

if ((za=0) and (max[j]<>zero)) then zb:=zb+1;

END;

if zb>1 then writeIn(A,'EXISTE BIFURCACION');

END;

PROCEDURE FINISH; {impresion para el final}

BEGIN

write(a,'=====');

writeIn(a,'=====');

write(a,' ',mat:8:1,' ',mati:8:1);

writeIn(a,' ',matil:8:1,' ',matild:9:1);

adela:=mati+matil;

writeIn(a,'gasto+derrames=',adela:8:1);

writeIn(a,'Nivel maximo en epoca de lluvias = ',nivnamo); writeIn(a,' ');

writeIn(a,'Entradas, Gasto de extraccion, Derrames ..... = millones.M3/mes');

writeIn(a,'Nivel Inicial, Nivel Final ..... = metros');

writeIn(a,'Potencia ..... = Mw/hr/mes');

writeIn(a,'Beneficios ..... = millones pesos');

END;

PROCEDURE RESULTADOS; {impresion de resultados}

BEGIN

if j=final

then BEGIN

writeIn(a,' ');

writeIn(a,' \*\*\*\*\* RESULTADOS \*\*\*\*\*');

write(a,'FECHA MES ENTRADAS NF NI Q-E DERRAME POT');

writeIn(a,' BENEFICIO BENEF-ACUM');

writeIn(a,ano\_inicial); ano:=ano\_inicial;

matil:=0;matild:=0;mat:=0;mati:=0; aa[j]:=primer;

END

else aa[j]:=politica[j+1];

mat:=mat+e[j]; mati:=mati+gastof[j];

matil:=matil+derramef[j]; matild:=matild+max[j];

if ext>0 then derramef[j]:=ext;

write(a,' ',j:3,' ',mes[xx], ' ',e[j]:7:1,' ',aa[j]:2,' ',politica[j]:2,' ');

write(a,gastof[j]:7:1,' ',derramef[j]:6:1);

writeIn(a,' ',potencia[j]:10:1,' ',maxf[j]:10:1,' ',matild:10:1);

END;

```

PROCEDURE AJUSTE; (se efectua un algoritmo para evitar discontinuidad en el tiempo)
BEGIN
    (en caso de existir)
    ext:=e[j]+ext-qmax;    ee[j]:=qmax;
    BENEFICIO;
    ESCOGER;
END;

```

```

PROCEDURE CENTRAL; (subrutina que efectua las iteraciones para cada periodo)
BEGIN
    final:=((ano_inicial-1925)*12)+mes_inicial;
    inicio:=((ano_final-1925)*12)+mes_final;
    xx:=mes_inicial;
    for j:=final downto inicio do
        BEGIN
            v:=j;
            if j=final then
                BEGIN
                    i:=primer;
                    nniv:=primer;
                END;
            vol[j]:=v[i];    ni[j]:=n[i];    ee[j]:=e[j]+ext;
            BENEFICIO;
            ESCOGER;
            if max[j]=zero then AJUSTE;
            i:=pp;
            politica[j]:=i;
            if xx=0 then
                BEGIN
                    ano:=ano-1;    writeLn(a,ano);
                    xx:=12;
                END;
            if (xx>4) and (xx<11) then nniv:=nivnmo
                else nniv:=level;
            if (ee[j]>e[j]) and (ee[j]<qmax) then ext:=0;
            RESULTADOS;
            xx:=xx-1;
        END;
    FINISH;
END;

```

```

BEGIN
    (programa principal)
    ext:=0;
    ASIGNACION;
    IMPRESION;
    ASIGNACION;
    LEE_ARCH;
    PREGUNTA;
    VOLUMENES;
    CENTRAL;
END.

```

**MANUAL DEL USUARIO PARA EL PROGRAMA QUE OPTIMIZA EL  
FUNCIONAMIENTO DE LA PRESA EL INFIERNILLO.**

**NOMBRE DEL PROGRAMA:** Infiernillo.

**DECLARACION (clave):** HELL.PAS

**FUNCION:** Optimiza el funcionamiento de la presa El Infiernillo durante los años 1925 - 1973 utilizando la programación dinámica determinista.

**PARAMETROS:**

nped = número de períodos durante los cuales se optimiza el sistema.  
 qmax = gasto máximo de extracción por las turbinas.  
 delvol = volumen constante en el vaso entre 2 niveles consecutivos.  
 level = niveles sobre la cortina.  
 zero = costo asociado a la imposibilidad de pasar de un nivel a otro en un período.  
 beta = constante para la fórmula de potencia.  
 nivturb = elevación sobre el nivel del mar de las turbinas del sistema.  
 namo = nivel de aguas máximo de operación.  
 namino = nivel de aguas mínimo de operación.

**FORMATO DE LOS DATOS DE ENTRADA:** Los datos de entrada son pasados al programa a través del archivo ESCURR.DAT que contiene los volúmenes mensuales de entrada al sistema entre los años 1925 y 1973.

**RESULTADOS:** Los resultados son escritos en pantalla o impresora (según decida el usuario), señalando para cada año: período, año, entrada mensual, nivel inicial en el vaso, nivel final en el vaso, gasto de extracción, derrame mensual, beneficio y beneficio acumulado hasta el período (mes) en cuestión. Al final se imprime el total del volumen derramado y el beneficio total acumulado.

**RESTRICCIONES:** Sirve para optimar el funcionamiento de la presa El Infiernillo durante cualquier intervalo de tiempo entre los años 1925 - 1973.

**COMENTARIOS:** Si se desea generalizar el programa para utilizarlo en la optimación de otra presa, hay que cambiar las variables, constantes y alterar las funciones de beneficio, castigo y elevacion-volúmenes. La estructura general del programa se mantiene igual.

## PROGRAM CREA\_ENTRADA;

(se introducen los datos de escurrimiento para la presa de Infiernillo  
en un archivo llamado ENTRADA.DAT)

CONST

n\_ped=588;

VAR

archivo:text;

entrada:real;

i:integer;

BEGIN

assign(archivo,'ENTRADA.dat');

rewrite(archivo);

for i := 1 to n\_ped do

BEGIN

{\$I-}

repeat

write(' entrada periodo ',i:5,' =');

readln(entrada);

until ( f0result = 0 );

write(archivo,entrada:5:0);

END;

{\$I+}

writeIn(archivo);

close(archivo);

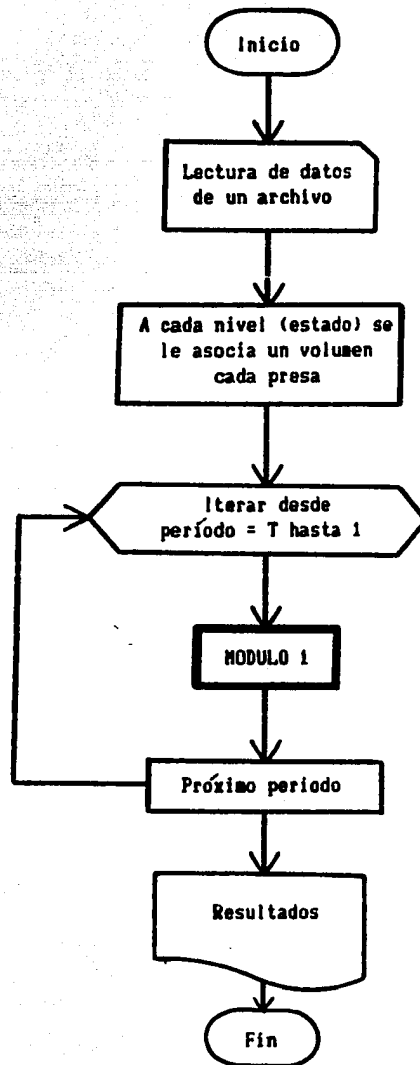
END.



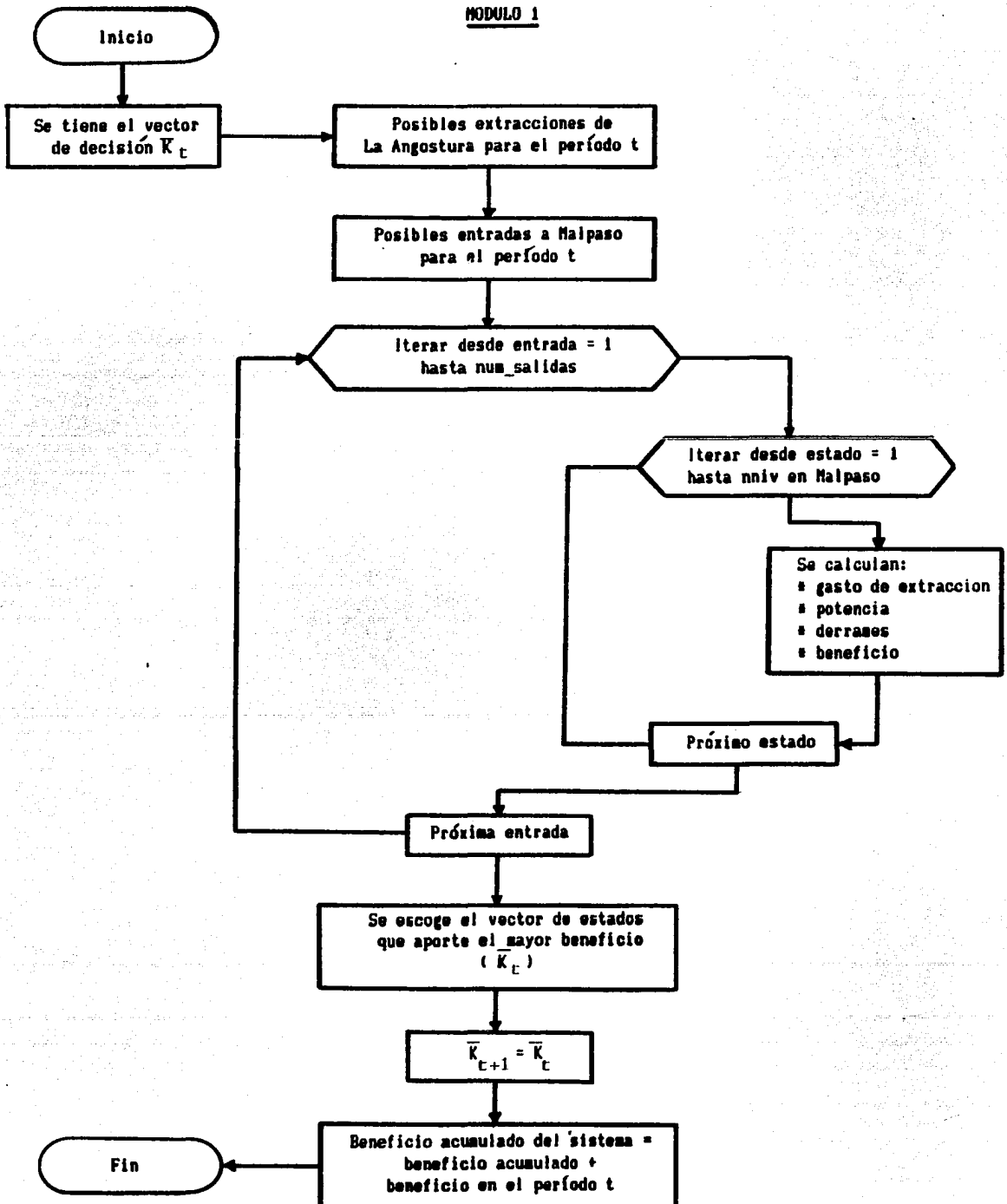
## ESCURRIMIENTOS PRESA INFIERNILLO

AÑO	ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1925	758.0	611.0	566.0	514.0	693.0	1471.0	3814.0	3239.0	3955.0	4223.0	1227.0	969.0
1926	547.0	441.0	409.0	371.0	500.0	1242.0	2011.0	2430.0	4754.0	3050.0	880.0	699.0
1927	541.0	437.0	405.0	367.0	495.0	1228.0	2583.0	2403.0	4704.0	3017.0	877.0	692.0
1928	418.0	337.0	312.0	283.0	382.0	948.0	1994.0	1855.0	3631.0	2329.0	878.0	534.0
1929	312.0	252.0	233.0	212.0	286.0	709.0	1491.0	1387.0	2715.0	1742.0	508.0	400.0
1930	263.0	210.0	200.0	182.0	245.0	600.0	1279.0	1190.0	2330.0	1849.0	434.0	343.0
1931	434.0	350.0	324.0	204.0	390.0	984.0	2069.0	1926.0	3769.0	2418.0	702.0	555.0
1932	269.0	216.0	250.0	132.0	246.0	609.0	1280.0	1191.0	2332.0	1496.0	435.0	343.0
1933	436.0	352.0	326.0	290.0	400.0	990.0	2082.0	1937.0	3792.0	2433.0	707.0	558.0
1934	482.0	388.0	360.0	327.0	442.0	1094.0	2300.0	2141.0	4189.0	2688.0	761.0	618.0
1935	535.0	428.0	396.0	365.0	485.0	1029.0	2530.0	2268.0	4870.0	2957.0	659.0	678.0
1936	547.0	441.0	409.0	371.0	500.0	1240.0	2608.0	2427.0	4750.0	3048.0	886.0	699.0
1937	599.0	488.0	447.0	406.0	548.0	1359.0	2857.0	2659.0	5224.0	3358.0	970.0	766.0
1938	412.0	332.0	308.0	280.0	377.0	934.0	1965.0	1828.0	3578.0	2295.0	607.0	527.0
1939	371.0	299.0	277.0	252.0	339.0	841.0	1769.0	1846.0	3222.0	2067.0	600.0	474.0
1940	271.0	216.0	282.0	184.0	243.0	615.0	1293.0	1203.0	2356.0	1511.0	439.0	347.0
1941	489.0	194.0	366.0	332.0	447.0	1109.0	2332.0	2170.0	4247.0	2725.0	792.0	625.0
1942	419.0	337.0	312.0	284.0	383.0	450.0	1998.0	1858.0	3636.0	2333.0	678.0	535.0
1943	369.0	297.0	276.0	260.0	337.0	718.0	1760.0	1578.0	3388.0	2056.0	598.0	472.0
1944	372.0	298.0	277.0	252.0	339.0	842.0	1790.0	1647.0	3223.0	2068.0	600.0	474.0
1945	276.0	222.0	286.0	187.0	252.0	625.0	1315.0	1224.0	2396.0	1537.0	448.0	353.0
1946	361.0	291.0	270.0	246.0	331.0	820.0	1724.0	1604.0	3140.0	2015.0	585.0	462.0
1947	479.0	386.0	358.0	325.0	438.0	929.0	2283.0	2846.0	4393.0	2667.0	775.0	612.0
1948	428.0	345.0	320.0	290.0	391.0	970.0	2089.0	1898.0	3714.0	2383.0	693.0	549.0
1949	234.0	189.0	175.0	159.0	214.0	532.0	1118.0	1040.0	2236.0	1391.0	579.0	300.0
1950	312.0	255.0	232.0	210.0	284.0	704.0	1482.0	1379.0	2099.0	1732.0	503.0	397.0
1951	365.0	284.0	273.0	247.0	334.0	828.0	1742.0	1621.0	3174.0	2036.0	592.0	567.0
1952	593.0	482.0	447.0	426.0	547.0	1557.0	2854.0	2656.0	5198.0	3335.0	909.0	765.0
1953	254.0	265.0	190.0	172.0	232.0	576.0	1210.0	1127.0	2295.0	1414.0	411.0	326.0
1954	489.0	395.0	366.0	332.0	447.0	1109.0	2334.0	2172.0	4250.0	2726.0	792.0	626.0
1955	313.0	532.0	512.0	463.0	166.0	510.0	2755.0	3829.0	7430.0	4854.0	1055.0	769.0
1956	587.0	485.0	435.0	383.0	708.0	1928.0	2430.0	1417.0	2412.0	1013.0	718.0	686.0
1957	622.0	528.0	559.0	534.0	297.0	761.0	1051.0	1306.0	2656.0	1081.0	468.0	397.0
1958	598.0	555.0	350.0	223.0	271.0	1076.0	3209.0	2714.0	5505.0	3085.0	2776.0	1083.0
1959	857.0	505.0	480.0	505.0	592.0	1943.0	2934.0	3822.0	2515.0	4079.0	944.0	600.0
1960	481.0	454.0	471.0	388.0	453.0	612.0	2247.0	2696.0	3200.0	1736.0	1075.0	627.0
1961	500.0	365.0	314.0	255.0	259.0	1232.0	3632.0	2751.0	3597.0	1351.0	1152.0	647.0
1962	469.0	338.0	319.0	297.0	340.0	363.0	1563.0	2040.0	5989.0	2196.0	750.0	552.0
1963	405.0	298.0	284.0	228.0	354.0	647.0	2583.0	4069.0	2299.0	3227.0	975.0	605.0
1964	570.0	379.0	321.0	250.0	334.0	706.0	3815.0	2419.0	5526.0	2302.0	784.0	645.0
1965	595.0	385.0	383.0	313.0	415.0	766.0	1572.0	5179.0	4449.0	2826.0	1846.0	587.0
1966	365.0	324.0	393.0	252.0	389.0	1471.0	2472.0	3553.0	3388.0	2581.0	844.0	544.0
1967	1516.0	434.0	350.0	358.0	341.0	1394.0	2184.0	2916.0	5801.0	2984.0	1258.0	733.0
1968	511.0	518.0	507.0	189.0	602.0	1335.0	2839.0	4523.0	3587.0	2565.0	792.0	684.0
1969	511.0	402.0	256.0	249.0	248.0	528.0	1720.0	5282.0	3032.0	2279.0	708.0	566.0
1970	395.0	391.0	254.0	175.0	188.0	1354.0	3312.0	5072.0	4832.0	2668.0	868.0	564.0
1971	492.0	361.0	242.0	287.0	255.0	860.0	2028.0	3306.0	5286.0	4348.0	938.0	633.0
1972	460.0	328.0	374.0	242.0	270.0	2228.0	3006.0	2431.0	3440.0	1387.0	764.0	428.0
1973	391.0	339.0	131.0	253.0	307.0	1148.0	2690.0	4197.0	5062.0	3697.0	1296.0	700.0

## ANEXO 2

DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROGRAMA ANG\_MAL

## MODULO 1



## PROGRAM ANGOSTURA\_MALPASO;

(determinacion de la politica de operacion para dos presas en cascada .Angostura y Malpaso)

CONST (constantes globales)

```

n_presas=2;          zero=-1E8;          nped=396;
n_niv=12;           FINAL=396;          INICIO=1;

```

VAR (variables globales)

```

folder,archivo,a:text;
niv,vol,dd,qq,pote,bb:array [1..2,1..n_niv] of real;
evaporacion,derram,entrada,cos_derr,elev_prom,entra,max,poten,benef:real;
sali,Heg,escalon,num_salidas,p,pp,k,H,J:integer;
acum_suma,suma_benef,plusSal,qa:array[1..397] of real;
evapo,ent,plusGas,minusDerr,plusPot,maxBen,acum_benef:array[1..2,1..397] of real;
der_A,q_A,pot_A,ben_A,max_ent,max_pot,derr_min,gasto:array[1..n_niv] of real;
qmax,delvol,alfa,nivturb:array[1..2] of real;
nivel_max,l:array[1..2] of integer;
mes:array[1..12] of string[4];
maxNiv:array[1..2,1..nped] of integer;
nivex,niv_A,plus_niv:array[1..n_niv] of integer;

```

PROCEDURE ASIGNACION; (se asignan valores a las constantes del sistema)

BEGIN

```

nivel_max[1]:=12;  qmax[1]:=2426;    delvol[1]:= 885;    alfa[1]:= 3.007;  nivturb[1]:=425;
nivel_max[2]:=12;  qmax[2]:=3732;    delvol[2]:= 853;    alfa[2]:= 3.1938;  nivturb[2]:=77.5;
mes[1]:='ENE';    mes[2]:='FEB';    mes[3]:='MZO';    mes[4]:='ABR';
mes[5]:='MAY';    mes[6]:='JUN';    mes[7]:='JUL';    mes[8]:='AGO';
mes[9]:='SEP';    mes[10]:='OCT';  mes[11]:='NOV';  mes[12]:='DIC';

```

END;

PROCEDURE IMPRESION; (el usuario escoge donde quiere imprimir los resultados)

var r:char;

BEGIN

writeln('impresion en (p)antalla o (i)mpresora?');

readln(r);

```

if r = 'i' then assign(a,'LST:');
else assign(a,'COM:');

```

writeln(a,#15);

END;

PROCEDURE LEE\_ARCH; (se leen los valores de escurrimientos mensuales para cada presa)

var x,y:integer; (de un archivo llamado flujos.dat)

BEGIN

assign(archivo,'c:\turbo\mar\flujos.dat');

reset(archivo);

for x:= 1 to n\_presas do

BEGIN

for y := 1 to nped do

BEGIN

read(archivo,entrada);

ent(x,y):=entrada;

END;

readln(archivo);

END;

close(archivo);

END;

PROCEDURE LEE\_EVAP; (se leen los valores de evaporacion para el vaso de la presa La Angostura)  
var x:integer;

```
BEGIN
  assign(folder,'evap.dat');
  reset(folder);
  for x:= 1 to nped do
    BEGIN
      read(folder,evaporacion);  evapo(1,x):=evaporacion;
      readln(folder);
    END;
  close(folder);
END;
```

PROCEDURE VOLUMENES; (curva elevacion-volumenes para cada presa)  
var x:integer; tr:real;

```
BEGIN
  BEGIN
    for p:=1 to n_presas do
      BEGIN
        for x:=2 to nivel_max[p] do
          BEGIN
            vol[p,x]:=(x-1)*delvol[p];    tr:=vol[p,x];
            if p=1 then niv[1,x]:=491.8*Exp((0.747*Ln(tr))+(Ln(0.0387)))
              else niv[2,x]:=141*Exp((0.8957*Ln(tr))+(Ln(0.010946)));
          END;
          vol[p,1]:=0;
        END;
        niv[1,1]:=491.8;  niv[2,1]:=141.0;
      END;
      (chequeo)
    BEGIN
      for p:=1 to n_presas do          (impresion de las elevaciones y volumenes)
        BEGIN                          (para cada nivel en cada presa)
          for x:=1 to nivel_max[p] do
            BEGIN
              write(na,'volumen',x:2,'1' =',vol[p,x]:7:1,'  nivel['',x:2,'] =',niv[p,x]:7:1);
            END;
          END;
        END;
      END;
    END;
  END;
```

PROCEDURE RESTRICION; (se escoge el nivel maximo para cada presa (NAMO))

```
BEGIN
  writeln(' ');  writeln(' PREGUNTAS');
  write(' Cual es el nivel maximo en la presa A = ?');
  readln(nivel_max(1));  writeln(nivel_max(1));
  write(' Cual es el nivel maximo en la presa B (aguas abajo) = ?');
  readln(nivel_max(2));  writeln(nivel_max(2));
END;
```

FUNCTION CostoA(poten:real):real; (funcion de beneficio para La Angostura ,B= 0.0105poten<sup>1.051</sup>)

```
BEGIN
  if poten=0 then CostoA:=0
    else CostoA:=(Exp((1.051*(Ln(poten)))+(Ln(0.0105)))));
END;
```

```

FUNCTION CostoB(poten:real):real; (funcion de beneficio para Malpaso ,B= 0.009poten 1.064)
BEGIN
  if poten=0 then CostoB:=0
    else CostoB:=Exp((1.064*(Ln(poten)))+(Ln(0.009)));
END;

```

```

PROCEDURE CASTIGO; (costo asociado a danos por derrames)
BEGIN
  cos_derr:=100*derram;
END;

```

```

PROCEDURE TURBINAR; (calculo de la energia mensual para ambas presas)
var ganan:real;
BEGIN
  if dd(p,k)>0 then CASTIGO
    else cos_derr:=0;
  poten:=(elev_prom-nivturb(p))*alfa(p)*qq(p,k);
  if p=1 then ganan:=costoA(poten)
    else ganan:=costoB(poten);
  benef:=ganan-cos_derr;
END;

```

```

PROCEDURE IMPOSIBLE; (subrutina en caso de no poder pasar de un nivel a otro)
BEGIN
  qq(p,k):=0; poten:=0; benef:=zero;
END;

```

```

PROCEDURE CALCULAR; (calculo de la potencia para todos los estados posibles en cada periodo)
var dv,gasto_pos,gasto_ext,derr,vp,arriba,abajo:real; t:integer;
BEGIN
  elev_prom:=(niv(p,H)+niv(p,k))/2;
  dv:=(H-k)*delvol(p);
  gasto_ext:=entra-dv;
  if gasto_ext<0 then gasto_ext:=0;
  derr:=gasto_ext-qmax(p);
  if derr<0 then derram:=0
    else derram:=derr;
  if gasto_ext<qmax(p) then gasto_pos:=gasto_ext
    else gasto_pos:=qmax(p);
  t:=nivel_max(p);
  if ((H<t) and (derr>0)) then derram:=0;
  if vol(p,H)<vol(p,k) then derram:=0;
  if k<H then derram:=0;
  if H<nivel_max(p) then derram:=0;
  vp:=vol(p,k)+entra-gasto_pos-derram;
  abajo:=vol(p,H)-(delvol(p)/2);
  arriba:=vol(p,H)+(delvol(p)/2);
  dd(p,k):=derram; qq(p,k):=gasto_pos;
  if ((vp>abajo) and (vp<arriba)) then TURBINAR
    else IMPOSIBLE;

  potep,k:=poten;
  bbp,k:=benef;
END;

```

PROCEDURE BENEFICIO; (calculo del beneficio mensual de todas las alternativas para ambas presas)

```

BEGIN
  if p=1 then
    BEGIN
      CALCULAR;
      der_A[sal1]:=dd(p,k);
      q_A[sal1]:=qq(p,k);
      pot_A[sal1]:=pote(p,k);
      ben_A[sal1]:=bb(p,k);
      niv_A[sal1]:=k;
    END
  else
    BEGIN
      for k:=1 to nivel_max(p) do
        BEGIN
          CALCULAR;
          END;
        END;
    END;
END;

```

END;

PROCEDURE SALIDAS; (extracciones posibles de La Angostura en cada periodo)

var x,y,z:integer;

sa:real;

BEGIN

if J=Final then Heg:=nivel\_max[1]

else Heg:=maxNiv[1,J+1];

entra:=ent[1,J]; H:=Heg; p:=1;

if ent[1,J]<delvol[1]

then

BEGIN

x:=0;

repeat

x:=x+1;

qa[x]:=ent[1,J]+((x-2)\*delvol[1]);

if qa[x]<0 then qa[x]:=0;

if (qa[x]+delvol[1])>qmax[1] then z:=Heg

else z:=(nivel\_max[1]\*2)-x;

k:=Heg+(x-2);

sal1:=x;

BENEFICIO;

if k > (nivel\_max[1]-1) then z:=Heg;

until(z=Heg);

END

else

BEGIN

qa[1]:=0;

s:=1;

for y:=nivel\_max[1] downto 0 do

BEGIN

sa:=ent[1,J]-(y\*delvol[1]);

if ((sa > 0) and (sa<qmax[1])) then

```

      BEGIN
        if y <= nivel_max[1] then
          BEGIN
            x:=x+1;
            if x=2 then nivex[1]:=y+1;
            qea[x]:=sa;
            nivex[x]:=y;
          END;
        END;
      END;
    for z:=1 to x do
      BEGIN
        k:=Heg-nivex[z];
        sal1:=z;
        BENEFICIO;
      END;
    END;
  num_salidas:=x;
END;

```

PROCEDURE ESCOGER; (se escoge la mejor politica para la presa de Malpaso)  
var z:integer; za,zb:real;

```

  BEGIN
    max:=bb(p,1);
    pp:=1;
    for z:=2 to nivel_max[p] do
      BEGIN
        if bb(p,z)>max then
          BEGIN
            max:=bb(p,z);
            pp:=z;
          END;
        END;
      END;
    zb:=0;
    for z:=1 to nivel_max[p] do
      BEGIN
        za:=max-bb(p,z);
        if ((za=0) and (max(>zero))) then zb:=zb+1;
      END;
    if zb>1 then writeln(a,'existe bifurcacion');
  END;

```



PROCEDURE ALIMENTACION; (se combinan las politicas posibles para cada presa)

```

var x:integer;
BEGIN
  if J=FINAL then H:=nivel_max[2]
    else H:=maxNiv[2,J+1];
  p:=2;
  for x:=1 to num_salidas do
    BEGIN
      entra:=qea[x]+ent[2,J];
      BENEFICIO;
      ESCOGER;
      max_ent[x]:=max;          plus_niv[x]:=pp;
      max_pot[x]:=pot[p,pp];   derr_min[x]:=dd[p,pp];
      gasto[x]:=qq[p,pp];
    END;
  END;

```

PROCEDURE ALTERNATIVAS; (se escoge la mejor politica para el sistema en cada periodo)

```

var x,IA:integer;
  maximum:real;
  alter:array [1..n_niv] of real;
BEGIN
  maximum:=0;
  for x:=1 to num_salidas do
    BEGIN
      alter[x]:=ben_A[x] + max_ent[x];
      if alter[x] > maximum then
        BEGIN
          maximum:=alter[x];
          IA:=x;
        END;
    END;
  maxNiv[1,J]:=niv_A[IA];
  maxNiv[2,J]:=plus_niv[IA];
  plusPot[1,J]:=pot_A[IA];
  plusPot[2,J]:=max_pot[IA];
  minusDerr[1,J]:=der_A[IA];
  minusDerr[2,J]:=derr_min[IA];
  plusGas[1,J]:=q_A[IA];
  plusGas[2,J]:=gasto[IA];
  maxBen[1,J]:=ben_A[IA];
  maxBen[2,J]:=max_ent[IA];
  acum_suma[J]:=acum_suma[J+1] + alter[IA];
END;

```

PROCEDURE CENTRAL; (subrutina que controla todos los calculos)

```

BEGIN
  for J:=FINAL downto INICIO do
    BEGIN
      if J=FINAL then acum_suma[J+1]:=0;
      writeLn('    PED = ',J);
      ent[1,J]:=ent[1,J]-evapo[1,J];
      SALIDAS;
      ALIMENTACION;
      ALTERNATIVAS;
    END;
  END;

```

```

PROCEDURE RESULTADOS; (subrutina que escribe los resultados de las corridas)
var x,xx,Year:integer; nif:array[1..2,1..nped] of integer; acumular:real;
BEGIN
  writeln(a,' ');
  writeln(a,' ***** R E S U L T A D O S *****');
  for p:=1 to n_presas do
    BEGIN
      writeln(a,' ');
      write(a,' POLITICA OPTIMA PARA LA PRESA DE ');
      if p=1 then writeln(a,'ANGOSTURA')
        else writeln(a,'MALPASO');
      writeln(a,' ');
      write(a,' ANO MES ENTRADAS NI NF Q-E DERRAMES POT');
      writeln(a,' BENEFICIO ACUM'); write(a,' ');
      x:=0; xx:=0;
      for J:=INICIO to FINAL do
        BEGIN
          Year:=1952+xx; x:=x+1;
          if J=INICIO then acumular:=0
            else acumular:=acum_benef[p,J-1];
          if J=FINAL then nif[p,J]:=nivel_max[p]
            else nif[p,J]:=maxNiv[p,J+1];
          if x=1 then writeln(a,Year:5);
          acum_benef[p,J]:=acumular+maxBen[p,J];
          writeln(a,mes[x]:8,' ',ent[p,J]:6:0,' ',maxNiv[p,J]:4,nif[p,J]:4,
            ' ',plusGas[p,J]:7:1,' ',minusDerr[p,J]:6:1,' ',
            plusPot[p,J]:10:1,' ',maxBen[p,J]:10:1,' ',acum_benef[p,J]:10:1);
          if x=12 then
            BEGIN
              xx:=xx+1; x:=0;
            END;
        END;
      END;
      writeln(a,' ');
      writeln(a,'BENEFICIO GLOBAL PARA EL SISTEMA ANGOSTURA - MALPASO = ',acum_suma[INICIO]:12:1);
      writeln(a,' ');
      writeln(a,'Entradas, Gasto de extraccion, Derrames ..... = millones.M3/mes');
      writeln(a,'Nivel Inicial, Nivel Final ..... = metros');
      writeln(a,'Potencia ..... = Mw/hr/mes');
      writeln(a,'Beneficios ..... = millones pesos');
    END;
  END;

```

```

BEGIN (programa principal)
  ASIGNACION;
  IMPRESION;
  LEE_ARCH;
  ent[2,237]:=1480.0 (correccion a la lectura)
  LEE_EVAP;
  VOLUMENES;
  RESTRICION;
  CENTRAL;
  RESULTADOS;
END.

```

MANUAL DEL USUARIO PARA EL PROGRAMA QUE OPTIMIZA EL FUNCIONAMIENTO DE  
EL SISTEMA LA ANGOSTURA - MALPASO.

NOMBRE DEL PROGRAMA: Ang\_mai.

DECLARACION (clave): TESIS.PAS

FUNCION: Optimiza el funcionamiento del sistema La Angostura-Maipaso durante los años 1952 - 1984 basado en la programación dinámica determinista.

PARAMETROS:

n\_presas = número de presas del sistema.  
n\_niv = nivel máximo del sistema.  
zero = costo asociado a la imposibilidad para pasar de un nivel a otro.  
nped = número de períodos del análisis.  
INICIO = período inicial del análisis.  
FINAL = período final del análisis.  
nivel\_max[1] = nivel máximo en La Angostura.  
nivel\_max[2] = nivel máximo en Maipaso.

FORMATO DE LOS DATOS DE ENTRADA: Los datos de escurrimiento son introducidos al programa Ang\_mai a través del archivo FLUJOS.DAT. Los valores de la evaporación son pasados a través del archivo EVAP.DAT.

RESULTADOS: Los resultados son desplegados en pantalla o impresora (según decida el usuario), señalando para cada presa y para cada año: año, mes, gasto total de entrada mensual (incluye la evaporación), nivel inicial en la presa al principio del mes, nivel final en la presa al terminar el mes, gasto mensual de extracción en millones de m<sup>3</sup>, gasto mensual de derrames por el vertedor en millones de m<sup>3</sup>, beneficio mensual y beneficio acumulado para cada presa.

RESTRICCIONES: Similar al programa Infiernillo, aunque, si se quiere optimar un intervalo diferente al especificado en las constantes globales al inicio (enero 1952, diciembre 1984) es necesario efectuar cambios al programa antes de efectuar las corridas.

COMENTARIOS: Similar al programa Infiernillo.

```
PROGRAM CREA_c:turbo\mar\flujos.dat;
```

(se introducen los datos de escurrimiento para cada presa y se guardan en un archivo llamado c:turbo\mar\flujos.dat.DAT)

```
CONST
```

```
  n_presas=2;      n_ped=396;
```

```
VAR
```

```
  archivo:text;
```

```
  entrada:real;
```

```
  i,j:integer;
```

```
BEGIN
```

```
  assign(archivo,'c:\turbo\mar\flujos.dat.dat');
```

```
  rewrite(archivo);
```

```
  for i:= 1 to n_presas do
```

```
    BEGIN
```

```
      for j := 1 to n_ped do
```

```
        BEGIN
```

```
          ($!-)

```

```
            repeat
```

```
              write('Presa ', i:2,' entrada periodo ',j:5,' =');
```

```
              readln(entrada);
```

```
              until ( IOresult = 0 );
```

```
              writet(archivo,entrada:5:0);
```

```
            END;
```

```
          ($!+)

```

```
        writeln(archivo);
```

```
      END;
```

```
    close(archivo);
```

```
END.
```

## ESCURRIMIENTOS PRESA " ANGOSTURA "

ANO	ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1952	288.0	210.0	183.0	162.0	261.0	970.0	1251.0	1818.0	1765.0	2460.0	993.0	580.0
1953	360.0	211.0	201.0	163.0	222.0	652.0	1215.0	869.0	1937.0	2335.0	795.0	410.0
1954	307.0	203.0	163.0	180.0	425.0	1359.0	1821.0	1237.0	2317.0	2035.0	807.0	411.0
1955	297.0	239.0	210.0	177.0	200.0	321.0	2103.0	1890.0	2538.0	3096.0	1493.0	672.0
1956	438.0	290.0	244.0	210.0	359.0	1065.0	1168.0	868.0	2682.0	2124.0	720.0	460.0
1957	358.0	268.0	296.0	280.0	272.0	540.0	862.0	1110.0	2068.0	1092.0	460.0	402.0
1958	317.0	230.0	223.0	184.0	200.0	870.0	1703.0	1730.0	2093.0	1934.0	903.0	621.0
1959	416.0	291.0	270.0	235.0	248.0	836.0	804.0	1407.0	1080.0	1997.0	800.0	467.0
1960	342.0	258.0	225.0	207.0	248.0	1240.0	1621.0	2043.0	2870.0	2240.0	1312.0	631.0
1961	440.0	338.0	302.0	263.0	273.0	728.0	947.0	963.0	1213.0	1143.0	1190.0	526.0
1962	356.0	247.0	210.0	229.0	216.0	664.0	1078.0	1291.0	3037.0	2155.0	791.0	462.0
1963	335.0	248.0	234.0	200.0	223.0	430.0	1429.0	1268.0	2469.0	1926.0	884.0	537.0
1964	387.0	271.0	221.0	182.0	217.0	770.0	1867.0	1204.0	2238.0	1847.0	593.0	439.0
1965	338.0	237.0	215.0	178.0	203.0	757.0	1045.0	1606.0	1957.0	3169.0	1010.0	527.0
1966	390.0	265.0	243.0	247.0	282.0	1081.0	1839.0	1405.0	2551.0	2667.0	1013.0	553.0
1967	401.0	286.0	244.0	233.0	205.0	494.0	593.0	1030.0	1028.0	1795.0	662.0	402.0
1968	301.0	224.0	197.0	172.0	276.0	876.0	1180.0	593.0	2169.0	2193.0	796.0	479.0
1969	330.0	224.0	204.0	188.0	254.0	614.0	1404.0	3257.0	4527.0	2091.0	1086.0	618.0
1970	416.0	295.0	257.0	201.0	213.0	456.0	1645.0	2174.0	3173.0	1913.0	1040.0	602.0
1971	417.0	284.0	245.0	209.0	233.0	408.0	617.0	1851.0	2178.0	2274.0	797.0	484.0
1972	357.0	260.0	225.0	193.0	267.0	816.0	922.0	1111.0	1080.0	891.0	505.0	355.0
1973	264.0	194.0	176.0	155.0	172.0	635.0	778.0	2669.0	2676.0	3060.0	1084.0	658.0
1974	433.0	284.0	268.0	211.0	257.0	445.0	730.0	463.0	1412.0	1007.0	338.0	247.0
1975	161.0	109.0	90.0	58.0	130.0	319.0	540.0	958.0	2144.0	2081.0	961.0	442.0
1976	334.0	267.0	268.0	253.0	309.0	1050.0	1500.0	633.0	1016.0	1333.0	558.0	490.0
1977	168.0	170.0	282.0	93.0	330.0	663.0	529.0	1101.0	1505.0	798.0	454.0	410.0
1978	261.0	206.0	205.0	213.0	491.0	719.0	1423.0	1369.0	2570.0	1574.0	581.0	408.0
1979	304.0	223.0	290.0	291.0	349.0	835.0	1225.0	1579.0	3590.0	1670.0	695.0	466.0
1980	472.0	276.0	274.0	303.0	323.0	576.0	740.0	1256.0	2842.0	1849.0	582.0	403.0
1981	313.0	198.0	232.0	241.0	292.0	1410.0	2097.0	2387.0	3198.0	2813.0	909.0	577.0
1982	249.0	263.0	229.0	214.0	541.0	1484.0	960.0	944.0	2074.0	2361.0	681.0	434.0
1983	285.0	294.0	292.0	219.0	201.0	713.0	1136.0	1329.0	2928.0	1078.0	629.0	407.0
1984	258.0	195.0	243.0	186.0	634.0	1564.0	1966.0	2559.0	3972.0	1902.0	632.0	477.0

## ESCURRIMIENTOS PRESA " MALPASO "

ANO	ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1952	340.0	257.0	217.0	249.0	398.0	1218.0	1295.0	1521.0	2465.0	3978.0	503.0	689.0
1953	223.0	213.0	201.0	129.0	178.0	474.0	741.0	579.0	1405.0	1987.0	883.0	729.0
1954	320.0	456.0	676.0	287.0	459.0	1702.0	2454.0	910.0	3373.0	2935.0	682.0	484.0
1955	211.0	455.0	243.0	129.0	101.0	279.0	2832.0	1651.0	4021.0	3366.0	1083.0	900.0
1956	211.0	160.0	230.0	95.0	789.0	2607.0	1085.0	754.0	3570.0	1700.0	919.0	602.0
1957	404.0	148.0	73.0	70.0	72.0	310.0	418.0	413.0	1817.0	770.0	319.0	721.0
1958	323.0	104.0	131.0	59.0	75.0	1018.0	1343.0	705.0	2077.0	1690.0	887.0	1070.0
1959	696.0	200.0	324.0	705.0	146.0	634.0	237.0	419.0	658.0	2073.0	1794.0	596.0
1960	411.0	170.0	176.0	181.0	122.0	353.0	527.0	806.0	1187.0	943.0	968.0	399.0
1961	620.0	293.0	328.0	110.0	276.0	438.0	537.0	867.0	753.0	1577.0	1764.0	259.0
1962	453.0	173.0	178.0	372.0	143.0	486.0	822.0	904.0	4362.0	1197.0	390.0	185.0
1963	379.0	392.0	416.0	134.0	126.0	166.0	1287.0	870.0	2717.0	1595.0	853.0	608.0
1964	567.0	249.0	256.0	303.0	212.0	946.0	1842.0	859.0	1556.0	1241.0	512.0	1176.0
1965	461.0	582.0	344.0	181.0	235.0	483.0	731.0	879.0	931.0	2233.0	876.0	858.0
1966	556.0	347.0	368.0	199.0	234.0	603.0	556.0	365.0	964.0	1270.0	645.0	405.0
1967	497.0	267.0	312.0	117.0	101.0	521.0	418.0	437.0	887.0	1247.0	509.0	586.0
1968	1027.0	310.0	173.0	117.0	142.0	977.0	777.0	475.0	1034.0	816.0	519.0	440.0
1969	351.0	209.0	160.0	156.0	207.0	177.0	997.0	1589.0	1640.0	1365.0	1014.0	625.0
1970	484.0	420.0	299.0	311.0	407.0	545.0	1198.0	1656.0	3306.0	2054.0	822.0	456.0
1971	369.0	298.0	389.0	336.0	299.0	436.0	594.0	856.0	148.0	1120.0	691.0	408.0
1972	438.0	233.0	209.0	304.0	272.0	688.0	699.0	632.0	533.0	477.0	349.0	506.0
1973	212.0	221.0	133.0	59.0	211.0	384.0	378.0	1488.0	1510.0	1653.0	729.0	430.0
1974	328.0	337.0	256.0	349.0	266.0	378.0	868.0	423.0	1200.0	1117.0	554.0	385.0
1975	331.0	202.0	165.0	148.0	201.0	248.0	318.0	507.0	1207.0	1265.0	400.0	154.0
1976	571.0	344.0	212.0	205.0	101.0	202.0	714.0	314.0	625.0	727.0	664.0	649.0
1977	249.0	347.0	256.0	197.0	230.0	298.0	335.0	572.0	378.0	542.0	642.0	502.0
1978	318.0	229.0	227.0	116.0	117.0	404.0	1046.0	575.0	1107.0	958.0	620.0	778.0
1979	600.0	508.0	493.0	507.0	617.0	916.0	804.0	1466.0	2507.0	696.0	617.0	909.0
1980	289.0	467.0	324.0	106.0	179.0	325.0	480.0	797.0	2508.0	1133.0	701.0	433.0
1981	206.0	488.0	134.0	90.0	263.0	954.0	1787.0	1645.0	1528.0	1292.0	571.0	254.0
1982	197.0	274.0	105.0	182.0	276.0	658.0	420.0	317.0	1173.0	1013.0	606.0	435.0
1983	417.0	158.0	131.0	58.0	52.0	228.0	608.0	685.0	2149.0	664.0	373.0	385.0
1984	409.0	272.0	219.0	145.0	420.0	938.0	1077.0	1218.0	2312.0	664.0	247.0	403.0

## EVAPORACIONES EN LA PRESA "LA ANGOSTURA"

ANO	ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1952	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1953	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1954	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1955	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1956	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1957	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1958	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1959	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1960	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1961	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1962	44.1	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	40.6	41.8	37.8	32.2	29.2	29.5
1963	36.2	42.7	64.1	64.3	49.1	38.3	35.5	39.6	31.5	34.8	29.8	29.2
1964	36.6	44.9	66.9	64.3	55.8	35.2	37.0	40.9	36.1	34.5	33.5	31.8
1965	33.0	45.2	63.1	62.8	56.9	35.4	36.4	36.2	38.4	28.2	27.5	27.2
1966	33.4	45.2	58.8	56.3	48.5	35.2	36.7	43.9	37.5	34.1	30.8	29.8
1967	34.3	45.2	61.3	59.2	60.1	38.6	39.1	39.7	34.5	33.1	32.8	33.1
1968	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1969	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1970	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1971	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1972	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1973	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1974	39.7	42.6	53.7	56.4	58.8	27.4	39.5	36.7	31.8	37.9	34.1	33.1
1975	36.9	46.3	63.1	66.8	52.9	38.3	42.4	43.5	36.9	35.5	32.5	34.2
1976	40.3	44.8	65.5	63.4	54.6	32.9	41.7	43.6	42.6	35.2	31.7	31.3
1977	39.1	43.5	64.9	59.8	57.5	36.9	45.2	40.5	37.5	38.2	36.8	36.8
1978	45.6	45.5	66.2	68.6	58.4	38.6	40.7	48.0	33.9	38.9	37.3	41.5
1979	45.1	49.3	66.5	63.4	60.2	35.3	43.6	39.2	31.7	34.4	34.4	34.3
1980	42.0	48.6	71.2	58.2	57.5	37.9	46.1	41.8	34.6	32.7	32.7	36.2
1981	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1982	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1983	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1
1984	41.0	44.9	61.9	62.2	54.1	35.9	39.1	39.6	34.5	33.1	32.8	33.1

## Apendice 1

Para establecer los nuevos NAMOs en las presas del sistema La Angostura-Malpaso, se efectuó el siguiente procedimiento:

A partir de la información acerca de los niveles de operación reales durante los años 1981 a 1984 (ver referencia 5)\*, se tomaron valores mensuales promedios que estuvieran por arriba de los valores mencionados en los folletos de información (ver referencias 5 y 10).

Para La Angostura, en 8 ocasiones se turbinó con niveles mensuales promedio de la superficie libre del agua arriba de 523.60 msnm. El promedio de elevaciones mensuales resultó ser 528.70 m, por lo tanto el NAMO para La Angostura es 528.70 m.

En Malpaso, en 24 ocasiones el nivel mensual promedio de la superficie libre del agua rebasó el NAMO del folleto de información sobre el sistema (176.00 m). El promedio fue de 180.60 m.

---

\* Manuscritos que sobre el mismo tema ha elaborado el autor de la referencia 5, para su tesis de maestría.



BIBLIOGRAFIA

- 1.- Domínguez Mora, Ramón y Aparicio Mijares, Francisco Javier, "Experiencias en el desarrollo de algoritmos para determinar políticas de operación de presas", Publicación de la Asociación Mexicana Hidráulica. El agua y su uso eficiente, 9o. Congreso Nacional de Hidráulica, Querétaro, México, 1986.
- 2.- R. Domínguez, C. Flores y O. Fuentes, "Operación conjunta del sistema de presas Infiernillo-Villita, de la cuenca del río Balsas", (Informe final)., Proyecto 3325. Octubre 1984. Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- 3.- Cárdenas Miguel A., La Ingeniería de sistemas. Filosofía y técnicas, - Ed. Limusa, México, 1978.
- 4.- Kaufmann, A. y Cruon, R. La Programación Dinámica, Ed. Continental, - México, 1964.
- 5.- Bautista González, León L., "Políticas de operación para el sistema de presas Angostura-Malpaso", Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, - UNAM, México, 1986.
- 6.- Volpi Funke, Marcelo y Aparicio Mijares, Francisco Javier, "Políticas de operación de plantas hidroeléctricas con programación dinámica determinista", Publicación de la Asociación Mexicana de Hidráulica, El agua y su uso eficiente., 9o. Congreso Nacional de Hidráulica, Querétaro, México, 1986.
- 7.- Mariño, Miguel A. & Mohammadi, Behzad., "Reservoir operation by Linear & Dynamic Programming", S.M. ASCE.
- 8.- Grogono, Peter, Programación en PASCAL, Ed. Fondo Educativo Interamericano, México, 1984.
- 9.- Folleto Planta Hidroeléctrica El Infiernillo , C.F.E. , 1976.
- 10.- Folleto Planta Hidroeléctrica Malpaso , C.F.E. , 1976.