



REPÚBLICA DE VENEZUELA
Ministerio de Obras Públicas
Dirección General de Recursos Hidráulicos
Dirección de Proyecto - Construcción
Análisis de Sistemas

J. O. S. E. C. Contreras J

Un Modelo para la Determinación del Esquema Óptimo de Abastecimiento de Agua Potable en una Región

Alain Dérédec
José M. Mejía
Gustavo Piñeiro
Helios Silvestre

UN MODELO PARA LA DETERMINACION DEL ESQUEMA
OPTIMO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE
EN UNA REGION

Alain Dérédec

José M. Mejía

Gustavo Piñeiro

Helios Silvestre

I N D I C E

	Pág.
I. INTRODUCCION	1
II. METODOLOGIA	4
II.1 El problema de secuencia de inversiones	4
II.2 El problema de distribución	5
II.3 El problema general	6
II.4 Métodos de resolución	8
II.5 La programación separable	9
II.6 El modelo de abastecimiento de agua	12
II.6-a Introducción	12
II.6-b La función objetivo	14
II.6-c Las restricciones del sistema	15
II.6-d La solución del problema y su estabilidad	17
III. OPTIMO ITINERARIO DE OBRAS PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUAS A LA REGION METROPOLITANA VALENCIA - MARACAY	19
III.1 Definición del Problema	19
III.1.1 Centros de consumo	21
III.1.2 Consumos y fuentes de suministro actuales	22
III.1.3 Demandas futuras	23
III.1.4 Déficits	25

	Pág.
III.2 Alternativas de abastecimiento	26
III.2.1 Introducción	26
III.2.2 Río Pao en Cachinche	27
III.2.2.1 Proyecto 01. Pao-Cachinche I	27
III.2.2.2 Proyecto 02. Pao-Cachinche II	28
III.2.3 Río Pao en Paso de la Balsa	28
III.2.3.1 Proyecto 03. Paso de la Balsa I	29
III.2.3.2 Proyecto 05. Paso de la Balsa II	30
III.2.3.3 Proyecto 07. Paso de la Balsa III	30
III.2.4 Río Maruria en Las Dos Bocas	30
III.2.4.1 Proyecto 09. Las Dos Bocas	30
III.2.5 Río Los Naranjos	31
III.2.5.1 Proyecto 10. Potrerito	31
III.2.6 Aducción Valencia - Maracay	31
III.2.6.1 Proyecto 12. Tubería Valencia - Maracay I	31
III.2.6.2 Proyecto 13. Tubería Valencia - Maracay II	31
III.2.6.3 Proyecto 14. Tubería Valencia - Maracay III	32
III.2.7 Aducción Valencia - Mariara	32
III.2.7.1 Proyecto 15. Tubería Valencia - Mariara	32
III.2.8 Río Chuao	32
III.2.8.1 Proyecto 22. Chuao I	32
III.2.8.2 Proyecto 24. Chuao II	33
III.2.8.3 Proyecto 25. Chuao III	33

	Pág.	
III.2.9	Río Choroní	34
	III.2.9.1 Proyecto 23. Santa Apolonia	34
III.2.10	Río Tiznados en Boca de La Platilla	34
	III.2.10.1 Proyecto 27. Boca de La Platilla	34
III.2.11	Río Guárico en Las Vegas	35
	III.2.11.1 Proyecto 28. Las Vegas I	35
	III.2.11.2 Proyecto 33. Las Vegas II	36
III.2.12	Aducción Villa de Cura - Maracay	36
	III.2.12.1 Proyecto 32. Tubería Villa de Cura - Maracay	37
III.2.13	Río Manuare en La Gonzalera	37
	III.2.13.1 Proyecto 29. La Gonzalera	37
III.2.14	Río Cerro Pelón en Los Bagres	37
	III.2.14.1 Proyecto 37. Los Bagres	37
III.2.15	Otras alternativas	38
III.2.16	Listado de proyectos	39
III.3	El Modelo para la Región Metropolitana Valencia - Maracay	39
	III.3.1 Centros de consumo	40
	III.3.2 Horizonte de planificación	40
	III.3.3 Fechas de control	40
	III.3.4 Año de construcción	41
	III.3.5 Demandas	41
	III.3.6 Proyectos	42
	III.3.7 Relaciones de dependencia	42

	Pág.	
III.3.8	Proyectos excluyentes	42
III.3.9	Continuidad de flujo	42
III.3.10	Valor de epsilon en las ecuaciones de gastos	43
III.3.11	Restricciones legales o institucionales	43
III.3.12	Proyectos en ejecución	44
III.3.13	Restricciones de capacidad	44
III.3.14	Tasa de interés	44
III.3.15	Costos	45
III.4	Análisis de resultados y sensibilidad	45
III.4.1	Itinerario óptimo	45
III.4.2	Modelos de operación	47
III.4.3	Análisis de sensibilidad	50
IV.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
A.	Conclusiones	54
B.	Recomendaciones	56

ANEXOS

LISTA DE CUADROS

- CUADRO N° 3.1 Consumos de Agua (1972). Región Metropolitana Valencia - Maracay
- 3.2 Demandas de Agua Potable e Industrial. Años 1970-2000. RMVM. Hipótesis : COPLANARH
- 3.3 Demandas de Agua Potable e Industrial. Años 1970-2000. RMVM. Hipótesis : INOS
- 3.4 Déficits de Agua. Años 1975-2000. RMVM. Hipótesis : COPLANARH-INOS
- 3.5 Itinerarios óptimos de Inversiones. Años 1975-2000. Tres Hipótesis de Demanda.
- 3.6 Programa de Inversiones. Años 1974-2000. Hipótesis de demanda: COPLANARH
- 3.7 Programa de Inversiones. Años 1974-2000. Hipótesis de demanda: PROMEDIO
- 3.8 Programa de inversiones. Años 1974-2000. Hipótesis de demanda: INOS
- 3.9 Modelo de Operación. Años 1975-2000 RMVM. Hipótesis de demanda : COPLANARH
- 3.10 Modelo de Operación. Años 1975-2000 RMVM. Hipótesis de demanda : PROMEDIO
- 3.11 Modelo de Operación. Años 1975-2000 RMVM. Hipótesis de demanda : INOS
- 3.12 Análisis de Sensibilidad. Tasa de Interés y Precio de Energía. Hipótesis de demanda : COPLANARH
- 3.13 Análisis de Sensibilidad. Tasa de Interés y Precio de Energía. Hipótesis de demanda : PROMEDIO
- 3.14 Análisis de Sensibilidad. Tasa de Interés y Precio de Energía. Hipótesis de demanda : INOS

LISTA DE GRAFICOS

- Gráfico N° 2.1 Caudal Suministrado por un Proyecto vs Tiempo
- 2.2 Flujo de Costos
- 2.3 Linealización por partes de una función, para uso en el método de programación separable
- 2.4 Descomposición de la variable X en función de X_1 y X_2
- 2.5 Descomposición de Q en función de I y P
- 3.1 Sistema Físico
- 3.2 Esquema de Alternativas
- 3.3 Modelo de Operación - Demanda - COPLANARH
- 3.4 Modelo de Operación - Demanda - PROMEDIO
- 3.5 Modelo de Operación - Demanda - INOS

A N E X O S

- ANEXO A Diseño Preliminar de Tuberías
- A.1 Costos unitarios de tuberías
 - A.2 Selección preliminar de diámetros
 - A.3 Costos de energía
 - A.4 Cálculo del Costo de Estaciones de Bombeo
- ANEXO B Linealización de Ecuaciones de Costos de Energía
- ANEXO C Cálculo de Fik y de Rik
- C.1 Cálculo del coeficiente Fik
 - C.2 Cálculo del coeficiente Rik

LISTA DE CUADROS DE LOS ANEXOS

- CUADRO A-1 Costos de Tuberías
- CUADRO A-2 Valores de m_{ϕ} para diferentes diámetros
- CUADRO B-1 Coeficientes de ecuaciones calculadas y linealizadas de costos de energía
- CUADRO C-1 Valores de Fik. Tasa de interés 8%
- CUADRO C-2 Valores de Rik. Tasa de interés 8%

LISTA DE GRAFICOS DE LOS ANEXOS

- GRAFICO B-1 Costo Anual de Energía. Tramo Pao-Cachinche-Valencia (ϕ 1370 mm)
- GRAFICO B-2 Costo Anual de Energía. Tramo Pao-Cachinche-Valencia (ϕ 1980 mm)
- GRAFICO B-3 Costo Anual de Energía. Paso de La Balsa-Cachinche (ϕ 1980 mm)

- GRAFICO B-4 Costo Anual de Energía. Tramo Potrerito-Las Dos Bocas (\varnothing 1070 mm)
- GRAFICO B-5 Costo Anual de Energía. Tramo Chuao-Maracay (\varnothing 1370 mm)
- GRAFICO B-6 Costo Anual de Energía. Tramo Chuao-Maracay (\varnothing 1220 mm)
- GRAFICO B-7 Costo Anual de Energía. Tramo Chuao-Maracay (\varnothing 760 mm)
- GRAFICO B-8 Costo Anual de Energía. Tramo Boca de La Platilla-Villa de Cura
(\varnothing 1520 mm)
- GRAFICO B-9 Costo Anual de Energía. Tramo La Gonzalera-Las Vegas (\varnothing 920 mm)

AGRADECIMIENTO

Los autores de este trabajo desean expresar su agradecimiento a las siguientes personas :

Al Ing. Guido Posewitz por su constante asesoría en la recabación de la información básica requerida.

A los Ingenieros Eduardo Buroz, Carlos Omar Mejía, Oscar González Pozo y Eduardo Martínez, quienes revisaron los borradores preliminares del informe y contribuyeron con críticas acertadas.

A los dibujantes Lucio González, Joaquín Acevedo, Miriam Alvarez, Mario Uzcátegui y Harry Gaudnik.

A las señoras Eneida de Colombani y Elina de Castro por su trabajo de mecanografía.

Al personal del Departamento de Servicios Básicos de la Dirección General de Recursos Hidráulicos por su colaboración en la publicación del informe.

ADVERTENCIA PRELIMINAR

Este trabajo se presenta como ilustración del tratamiento metodo lógico de la solución de un problema particular de planeamiento.

Los resultados que se incluyen no deben tomarse como una recomendación concreta para un plan de acción en la Región Metropolitana - Valencia-Maracay.

En los actuales momentos se está reformulando el esquema de a provechamiento con la inclusión de una nueva fuente muy importante como es el Lago de Valencia. Por otra parte, se han re-evaluado todas las cifras de costos, las cuales han sufrido cambios significativos; igualmente, se han actualizado los estudios hidrológicos de las fuentes.

Una modificación adicional ha consistido en la inclusión, dentro de la región, de las poblaciones ubicadas en el eje Cagua-Tejerías.

En fecha breve se publicará el informe definitivo, el cual comprende todos los cambios apuntados.

I. INTRODUCCION

Un problema típico de la planificación de recursos hidráulicos consiste en definir un plan de acción a nivel de región con el cual se satisfagan, a través de la construcción de un conjunto de obras de diversa naturaleza, las demandas de agua que se prevean existirán en el período de planeamiento. Estas demandas se refieren a todos los usos del agua (agua potable, agua para industrias, riego, recreación, etc.). Adicionalmente, dentro de un esquema de múltiple aprovechamiento, debe contemplarse el saneamiento de tierras y el control de inundaciones.

La existencia de una serie de demandas en el tiempo, para usos alternativos del agua, localizadas en sitios diferentes, y la posibilidad de satisfacer esas demandas en forma total o parcial desde diversas fuentes de suministro, plantea la necesidad de definir un esquema óptimo de aprovechamiento de los recursos hidráulicos a nivel de región, entendiéndose por éste, el dimensionamiento adecuado de las diferentes obras, el momento preciso en el tiempo en que se debe iniciar su construcción, y el modelo de distribución y manejo de las aguas.

Un crecimiento acelerado de la demanda, en combinación con la falta de nuevas fuentes de abastecimiento cercanas a los lugares de consumo, el aumento de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, y la sobreexplotación a que se ha llevado algunos acuíferos, hacen que el problema del suministro de agua para uso municipal (agua potable, agua para industrias, prevención de incendios, agua para servicios comunitarios) se haya vuelto particularmente agudo en varias regiones de Venezuela: Región Capital, Región Metropolitana Valencia-Maracay, Conjunto Morón-Puerto Cabello, Complejo Maracaibo-El Tablazo.

Es evidente que en la mayoría de estos casos, además del problema acucioso de abastecimiento de agua para uso municipal, están involucrados otros usos del agua : riego, control de inundaciones, etc.

Como un primer intento para la solución del complejo problema de definición del esquema óptimo de aprovechamiento para usos múltiples, en este trabajo se centra el interés en la solución del aprovechamiento para uso urbano e industrial del agua, señalándose que en avances posteriores se deberá ampliar el modelo para la inclusión de otros destinos del agua.

En cada caso se presenta un conjunto de centros de consumo para los cuales se han proyectado demandas de agua para uso urbano e industrial, generalmente crecientes en el tiempo, y se ha recomendado un cierto número de fuentes factibles, con información a diversos grados de elaboración, pasando desde niveles de estudios preliminares a anteproyectos y proyectos. Bajo estas condiciones es necesario producir un itinerario óptimo de inversiones, siendo el criterio de optimalidad más frecuentemente utilizado el mínimo valor presente de los costos.

Un esquema óptimo de aprovechamiento, además de un itinerario de inversiones, debe incluir un plan de operación, definido éste por :

- i) una combinación técnicamente factible de las fuentes de abastecimiento
- ii) los volúmenes de agua posibles de extraer de una fuente específica; estos podrán variar desde cero hasta la capacidad máxima operable
- iii) el destino de los volúmenes extraídos

El número de las combinaciones factibles es muy grande y a cada una corresponderá un esquema de operación diferente, por lo que se hace necesario el uso de técnicas matemáticas con el apoyo de una computadora a fin de obtener la solución óptima.

En el presente estudio se propone una metodología para resolver el problema de suministro de agua para uso municipal antes descrito. Se ha construído un modelo matemático basado sobre el método de programación separable y se ha probado dicho modelo para obtener el itinerario de inversiones y el esquema de distribución de agua hasta el año 2000 para la región Metropolitana Valencia-Maracay. La estabilidad de la solución óptima propuesta ha sido verificada mediante análisis de sensibilidad.

II. METODOLOGIA

En términos de análisis de sistemas el problema planteado es a la vez un problema de secuencia de inversiones y un problema de distribución.

II.1 El problema de Secuencia de Inversiones

Según se señaló en la introducción, el plan de acción óptimo para una región, en términos del aprovechamiento de sus recursos hidráulicos, requiere la definición de un itinerario de inversiones. Este consiste en el ordenamiento en el tiempo de una serie de decisiones de inversión, es decir, la identificación del momento en que debe construirse cada proyecto, entendiéndose por proyecto un conjunto técnicamente factible de obras (presa, túnel, carretera de acceso, acueducto, estaciones de bombeo, etc.) que forman un todo.

A una misma fuente de agua pueden asociarse varios proyectos, por ejemplo: diferentes posibles sitios de presa, los cuales pueden o no ser excluyentes; diferentes tamaños de presa, diámetros y trazados de tuberías, etc.

Costos
Al problema de secuencia de inversiones se asocian una serie de costos, a saber: la inversión inicial, o sea el valor de las obras en el momento en que se inicie la construcción; los costos de administración y mantenimiento de la obra; y, finalmente, las reposiciones al fin de la vida útil de las respectivas estructuras, equipos, etc., si hay lugar a ello.

Se comprenderá que, dado un período de análisis, un determinado proyecto puede tener diferente valor actual de acuerdo al momento del tiempo en el cual se decida que va a ser construido, no sólo por e

fecto de las diferentes fechas en las cuales se efectuaría la inversión, si no también por cuanto la fecha de construcción será determinante en la consideración de reposiciones y el cálculo de valores residuales.

Para el tratamiento de los costos asociados al problema de secuencia de inversiones, se hacen normalmente simplificaciones, tales como la de considerar que la inversión fija ocurre en un sólo momento del tiempo. En este caso se ha considerado esta simplificación y se ha aplicado no sólo para los costos de inversión sino también para los de reposición y los de operación y mantenimiento, es decir, para cada posible fecha de construcción existirá un flujo de gastos por los conceptos anteriores, los cuales, mediante las actualizaciones pertinentes, pueden llevarse como una suma total al momento de construcción.

Simplezas.

II.2 El Problema de Distribución

En un momento dado, en una región existirán una serie de centros de consumo, con demandas por agua, y un conjunto de fuentes de suministro con determinadas capacidades.

En general, dada la red de distribución existente, podrá enviarse agua de más de una fuente a un determinado centro de consumo y, paralelamente, una misma fuente podrá suministrar agua a diferentes centros de consumo. Ahora bien, cada flujo asociado a las diferentes alternativas arriba esbozadas tendrá un costo diferente en términos del costo del agua suministrada por unidad de volumen. Ya que en el punto anterior se han tomado en cuenta una serie de costos, en este momento los costos relevantes se refieren a los de distribución, constituidos por los costos de operación y energía de bombeo. Se excluyen del problema, tanto

los costos de distribución a nivel de red urbana, como los de tratamiento.

La solución al problema de distribución consiste en definir, dado el conjunto de obras existentes en cualquier instante y las demandas de los centros de consumo en ese momento, los caudales a ser extraídos de cada fuente y su destino.

11.3 El Problema General

Los dos puntos anteriores deben haber ilustrado la naturaleza del problema conjunto. El problema de secuencia de inversiones, se señaló, era uno de minimización del valor actual del flujo de costos fijos en que se incurre con la puesta en marcha de un conjunto de proyecto en distintos momentos del tiempo. El de distribución puede verse como un problema de transporte para cualquier instante que se considere, en el cual el objetivo es la minimización de los costos de distribución.

En el planteamiento general, se requiere combinar ambos problemas, es decir, encontrar el itinerario de inversiones y el esquema de distribución, para cada período, que optimicen el suministro de agua a los centros de consumo hasta el horizonte de planificación, respetándose todas las restricciones físicas y legales características del sistema.

En la planificación de los recursos hidráulicos, particularmente cuando son considerados usos múltiples, el criterio de optimización utilizado, en general, es la maximización de los beneficios netos (beneficios menos costos). En el presente estudio, se considera un sólo fin, el abastecimiento de agua municipal. Adicionalmente, no se asigna un valor diferencial al agua según el volumen demandado o bien según el cen

tro de consumo. En virtud de las consideraciones anteriores, el criterio de optimización elegido ha sido sencillamente la minimización del valor actual del flujo de costos totales del suministro de agua hasta el horizonte de planificación, sujeto a la restricción de cubrir las demandas de agua en los centros de consumo.

La reunión de los dos problemas antes señalados, plantea la siguiente situación en cuanto a costos :

Cada proyecto se caracteriza por el caudal que suministra, caudal que puede tomar cualquier valor entre cero y el caudal máximo entregable por este proyecto. Se supone que se incurre en todos los costos fijos en el momento en que se construye el proyecto (1); a partir de allí, ocurren los costos de operación y energía de bombeo, los cuales pueden ser considerados como función solamente del caudal suministrado. La función de costos de energía es cúbica y sus parámetros están determinados por el diámetro de la tubería, su longitud y por la altura geométrica de bombeo (Véase Anexo B).

En el gráfico N° 2.1 está representado esquemáticamente el caudal suministrado por un proyecto, en función del tiempo. En el mismo se observa que se presenta una discontinuidad en el momento de la puesta en servicio del proyecto.

El gráfico N° 2.2 presenta el flujo de costos típico asociado con el mismo proyecto : en la fecha de puesta en servicio del proyecto

(1) El período de construcción usual se supone que dura tres años, y como fecha de construcción se toma el centro de ese lapso.

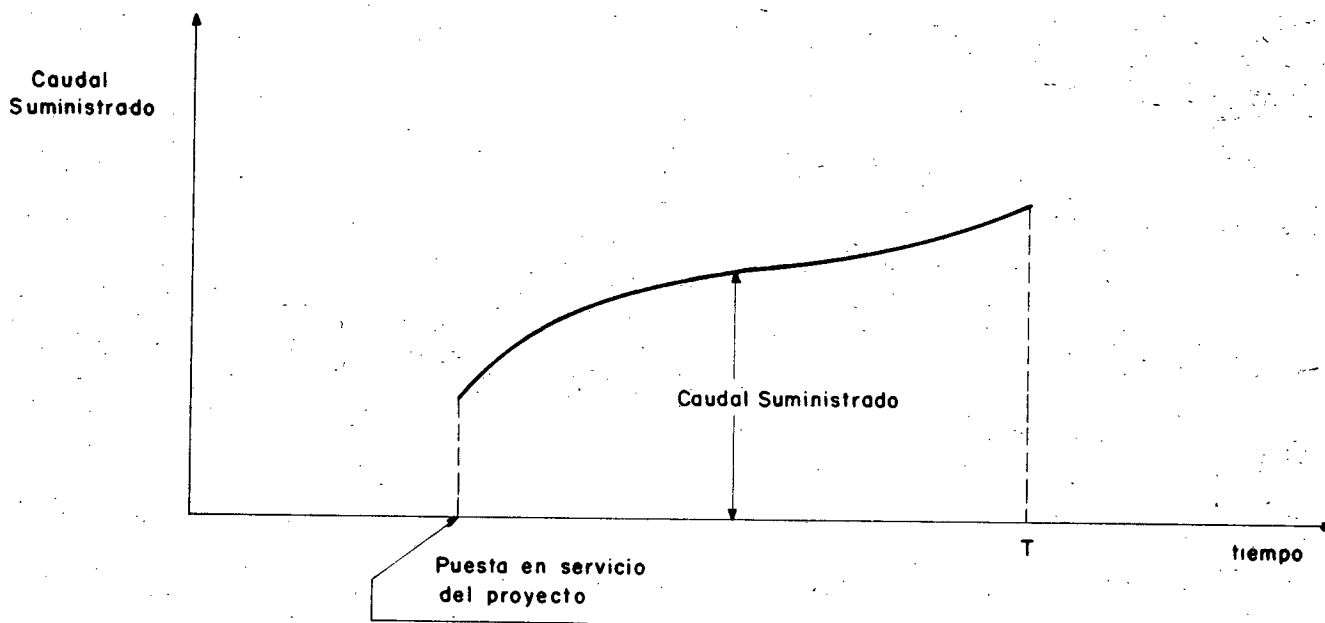


GRAFICO Nº 2.1- CAUDAL SUMINISTRADO POR UN PROYECTO vs TIEMPO

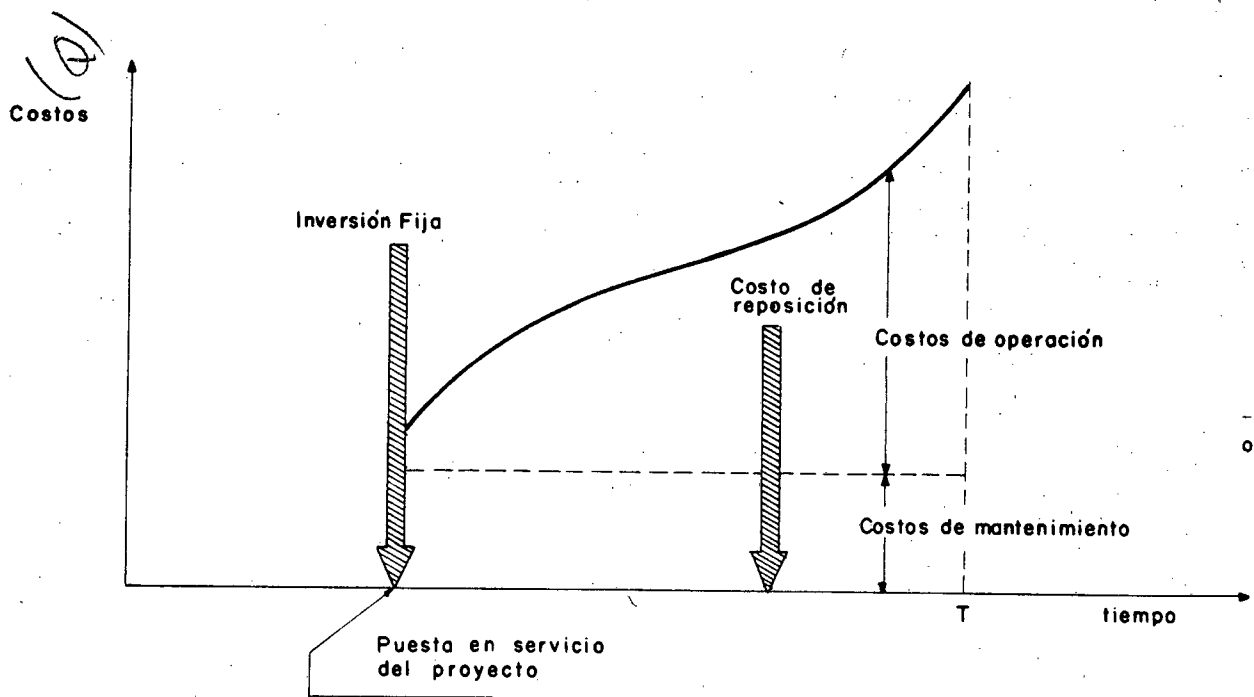


GRAFICO Nº 2.2 FLUJO DE COSTOS

ocurre la inversión inicial; después, se presentan los costos de reposiciones, dependiendo de la vida de los diferentes componentes del proyecto, y, de manera continua, los costos constantes de administración y mantenimiento, y los costos de operación, estos últimos, función del caudal suministrado.

II.4 Métodos de resolución

Se ha visto previamente que el problema general de definir un plan de aprovechamiento del recurso agua se descompone en dos problemas : uno de secuencia de obras y otro de distribución de volúmenes de las fuentes en los destinos. Obviamente estos dos no son independientes. Por una parte, la operación de un proyecto no empieza sino después de su fecha de puesta en servicio, la cual es determinada por la resolución del problema de secuencia. Por otra parte, la decisión de construir un proyecto depende de la futura manera de operarlo, vale decir, de los volúmenes que serán extraído, así como de la operación de los demás proyectos. Por eso se debe resolver el problema globalmente.

Problemas de este tipo no se pueden resolver satisfactoriamente por medio de un modelo de programación lineal, por ejemplo, un modelo de transporte, a causa de las discontinuidades que ocurren en las fechas de puesta en servicio de proyectos nuevos, y por la no linealidad de la función de costos (1). En la planificación de recursos hidráulicos, de todas las técnicas matemáticas que se han venido experimentando, dos pa

(1) Este segundo problema puede aproximarse satisfactoriamente linealizando las funciones de costos, pero el problema de las discontinuidades en el flujo de costos persiste.

recen ser particularmente adaptables al problema planteado : la programación entera mixta y la programación separable. En este trabajo, se escogió el último método por las facilidades ofrecidas por el "programa - producto" MPS (Mathematical Programming System) de la IBM, el cual se encuentra disponible en el Centro de Computación del Ministerio de Obras Públicas.

II.5 La programación separable

No siendo el objetivo de este punto exponer los detalles de la teoría de la programación separable, se estimó sin embargo necesario explicar brevemente los principios básicos de dicho método, de modo de facilitar la comprensión de su utilización. (1)

Sea $F(x)$ una función no lineal de una sola variable. Dicha función puede ser aproximada por medio de una función poligonal tal como se puede ver en el gráfico N° 2.3.

El intervalo de definición de la variable X , o sea (X_m, X_M) , se puede dividir en subintervalos adyacentes $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$.

Cualquier valor de X entre X_m y X_M se puede expresar por medio de una combinación lineal de "variables especiales" X_1, X_2, \dots, X_n de la manera siguiente :

$$X = X_m + d_1 * X_1 + d_2 * X_2 + \dots + d_n * X_n \quad (1)$$

definiéndose como "variables especiales" aquellas cuyo dominio está acotado entre -0 y -1 , y además cumplen la siguiente condición :

(1) Aquí se sigue, en líneas generales la presentación del Manual de IBM.

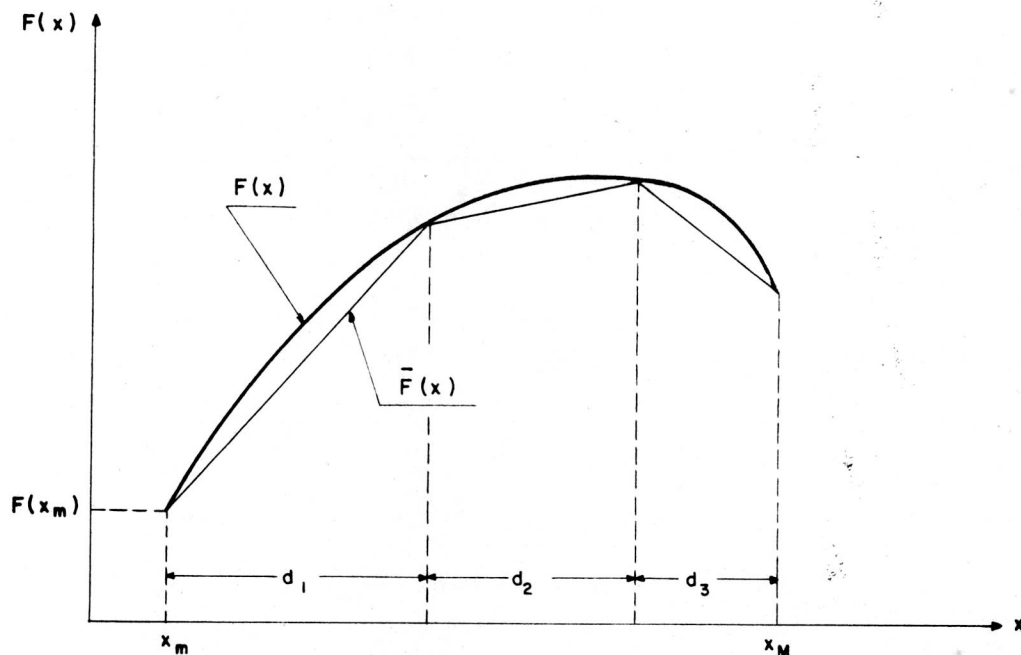


GRAFICO N° 2.3

LINEALIZACION POR PARTES DE UNA FUNCION, PARA USO EN EL METODO DE PROGRAMACION SEPARABLE

Si X pertenece al intervalo d_i , entonces :

$$X_1 = X_2 = X_3 = \dots = X_{i-1} = 1$$

$$0 \leq X_i \leq 1 \tag{2}$$

$$X_{i+1} = X_{i+2} = \dots = X_n = 0$$

Es decir, que, del conjunto de variables especiales que describen una variable de decisión X , una sola puede estar a un nivel intermedio. Todas las variables que preceden a dicha variable especial deben estar a su nivel máximo (uno); todas las variables que la siguen deben estar a su nivel mínimo (cero).

Por otra parte las pendientes de cada uno de los lados del polígono no son :

$$D_1 = \frac{F(X_m + d_1) - F(X_m)}{d_1}$$

$$D_2 = \frac{F(X_m + d_1 + d_2) - F(X_m + d_1)}{d_2}$$

$$D_n = \frac{F(X_m + d_1 + d_2 + \dots + d_n) - F(X_m + d_1 + \dots + d_{n-1})}{d_n}$$

Entonces una función no lineal $F(X)$, de una sola variable X , puede aproximarse por una función lineal $\bar{F}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ de varias variables X_1, X_2, \dots, X_n , de la manera siguiente :

$$\bar{F}(X_1, X_2, \dots, X_n) = F(X_m) + D_1 * X_1 + D_2 * X_2 + \dots + D_n * X_n \tag{3}$$

Esta linealización, necesaria para la resolución de cierto tipo de problemas, conlleva dos desventajas.

Lo anterior ilustra por qué la utilización del método de programación separable en un proceso de optimización no garantiza un óptimo global. En efecto, si el procedimiento iterativo cae en un óptimo local, el algoritmo termina allí. Para alcanzar un óptimo "superior", la solución debe ser forzada a salir de este óptimo local, mediante un cambio adecuado de base. La existencia de estos óptimos "superiores", puede no ser evidente, y el sacar la solución del óptimo local generalmente requiere un conocimiento bastante amplio del problema real que se trata de modelar.

11.6 El modelo de abastecimiento de agua

11.6-a Introducción :

Sea Q_{ik} el caudal que el proyecto i está entregando en el momento K , y C_i , el caudal máximo entregable por este proyecto.

De acuerdo a los elementos de programación separable descritos en el punto anterior, se puede descomponer Q_{ik} de la manera siguiente :

$$Q_{ik} = \varepsilon * I_{ik} + (C_i - \varepsilon) * P_{ik} \quad (4)$$

donde I_{ik} y P_{ik} forman el conjunto de variables especiales que describen Q_{ik} . Así Q_{ik} , I_{ik} , P_{ik} son los análogos respectivamente de X , X_1 y X_2 en la Ec. (1), así como ε y $(C_i - \varepsilon)$ son los análogos de d_1 y d_2 (ver Gráfico 2.5), quedando expresadas las ecuaciones del tipo (2) por el conjunto de condiciones siguientes :

$$a) \quad 0 \leq I_{ik} \leq 1, \quad 0 \leq P_{ik} \leq 1 \quad (5)$$

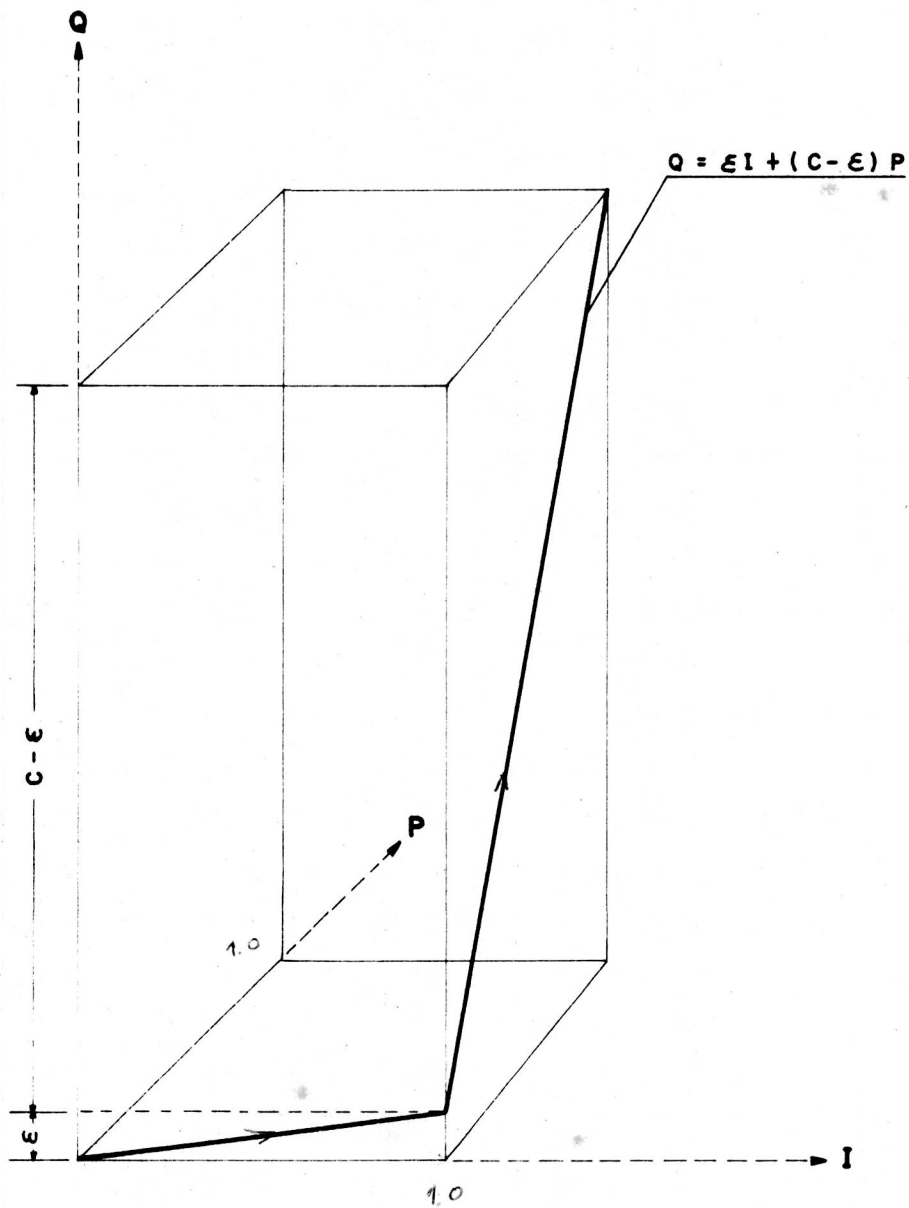


GRAFICO 2.5 DESCOMPOSICION DE Q EN FUNCION DE I y P

b) si $I_{ik} < 1$, entonces $P_{ik} = 0$

La ventaja de dividir el campo de definición de Q_{ik} en dos subintervalos adyacentes, (ϵ) y $(C_i - \epsilon)$, consiste en que de esta manera se puede manejar el problema de la discontinuidad en las funciones de gastos.

I_{ik} juega el papel de un indicador de construcción. Es evidente que a pesar de que el dominio de I_{ik} está entre 0 y 1, tan sólo se está interesado en los valores extremos, ya que $I_{ik} = 0$ significará que el proyecto no ha sido construido, y $I_{ik} = 1$ querrá decir que el proyecto está construido. El menor k cuyo $I_{ik} = 1$ indicará la fecha de construcción.

La manera de lograr esta situación deseable (o sea que I_{ik} efectivamente opere como un indicador de construcción) es manipulado el valor de ϵ en la definición de Q_{ik} (Ec. 4). Así, seleccionando un ϵ menor que la precisión asociada al cálculo de la variable Q_{ik} garantizará que I_{ik} tome solamente los valores 0 ó 1.

P_{ik} corresponde al porcentaje de aprovechamiento. Como se recordará, de acuerdo a los elementos señalados anteriormente, P_{ik} será mayor que cero sólo si $I_{ik} = 1$. Por lo tanto, dado que ϵ es muy pequeño, $C_i - \epsilon$, para todo efecto práctico, es igual a C_i , o sea, el caudal máximo entregable por el proyecto. Puesto que P_{ik} puede tomar cualquier valor entre 0 y 1, $P_{ik} * C_i$ será el gasto suministrado por el proyecto.

II.6-b La función objetivo :

Sea Z el valor presente del costo total del abastecimiento de agua municipal. Mediante la utilización de la Ec. (4), la función objetivo puede presentarse de la manera siguiente :

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{k=0}^T (I_{ik} - I_{i,k-1}) * F_{ik} + P_{ik} * C_i * R_{ik} \quad (6)$$

La primera sumatoria se hace sobre el conjunto total de proyectos; la segunda, sobre el conjunto de fechas de control consideradas hasta el horizonte de planificación, siendo T el número total de tales fechas.

Los diferentes parámetros que aparecen en Ec. (6) se definen así :

- a) F_{ik} es el valor presente de los costos fijos asociados con el proyecto i , si éste se construyera 2,5 años antes de la fecha k . Según el método propuesto en el Anexo C, F_{ik} queda expresado por :

$$F_{ik} = K_i * a_{1k} + AM_i * a_{2k} + RK_i * a_{3k} \quad (7)$$

- en donde: - K_i es la inversión inicial del proyecto i
- AM_i es el costo anual de administración y mantenimiento
- RK_i es el costo de reposición (si hubiere lugar a él)
- a_{1k} , a_{2k} y a_{3k} son coeficientes de actualización (véase Anexo C)

b) $P_{ik} * C_i * R_{ik}$ es el valor presente de los costos de operación. Estos se asumen proporcionales al caudal suministrado Q_{ik} . El cálculo del factor de actualización R_{ik} puede verse en el Anexo C.

Para expresar que un proyecto construido en el momento k , permanece hasta el horizonte de planificación, se deben agregar a la Ec. (6) las siguientes restricciones :

$$I_{ik} \geq I_{i,k-1} \quad (\text{para todo } i \text{ y todo } k)$$

o sea, si $I_{i,k-1} = 1$, entonces $I_{ik} = 1$

si $I_{i,k-1} = 0$, entonces $I_{ik} = 0 \text{ ó } 1$ (8)

Al colocar F_{ik} en la función objetivo, multiplicado - por la diferencia de los indicadores, se asegura que se considesólo el flujo de costos fijos correspondiente al indicador I_{ik} - del período correspondiente a la fecha de construcción.

II.6-c Las restricciones del sistema :

Las restricciones que describen el sistema físico de abas-
tecimiento de agua, se pueden escribir mediante la utilización
de los indicadores de construcción I , de los porcentajes de a-
provechamiento P y de los caudales Q . A continuación se
plantean las restricciones clásicas usadas en este tipo de pro-
blema :

a) Relaciones de dependencia entre proyectos :

Para expresar que un proyecto j necesita la construcción previa (o simultánea según sea el óptimo) de - otro proyecto i , se tiene :

$$I_{jk} \geq I_{ik} \quad (\text{para todo } k)$$

o sea si $I_{ik} = 0$, entonces $I_{jk} = 0$

$$\text{si } I_{ik} = 1, \text{ ahora } \begin{matrix} I_{jk} = 0 \\ \text{ó} \\ I_{jk} = 1 \end{matrix} \quad (9)$$

b) Incompatibilidades entre dos (o más) alternativas :

Estas restricciones se refieren a aquellos proyectos que son mútuamente excluyentes, o sea al hecho que al tomar la decisión de construir un proyecto, simultáneamente se está decidiendo la no construcción de otro (u otros). Esta condición se cumple con la restricción :

$$\sum_i I_{jk} \leq 1 \quad (\text{para todo } k) \quad (10)$$

donde la sumatoria se hace sobre el conjunto de alternativas excluyentes.

c) Continuidad de flujo :

Esta restricción se usa para indicar que la suma de los caudales que concurren a un nodo de flujo debe ser, en total, igual a la suma de los gastos que salen de ese nodo. Se tiene entonces :

$$\sum_l Q_{lkn} = \sum_m Q_{mkn} \quad (\text{para todo } k) \quad (11)$$

donde el índice l caracteriza los caudales que entran y el índice m , los caudales que salen, todo ello referido al nodo n .

d) Satisfacción de las demandas :

Sea D_{mk} la demanda del centro de consumo m , en el momento k . La satisfacción de esa demanda se asegura de la manera siguiente :

$$\sum_i Q_{ik} = D_{mk} \quad \text{(para cada } m, \text{ y para cada } k) \quad (12)$$

donde el índice i caracteriza los caudales que llegan al centro de consumo m , bien directamente de una fuente o de un nudo.

e) Limitaciones de caudales :

Para expresar que el caudal Q_{ik} no puede exceder un cierto límite B_{ik} en el momento k , sencillamente se tiene :

$$Q_{ik} \leq B_{ik} \quad (13)$$

Este tipo de restricción debe establecerse para aquellos proyectos cuyo gasto máximo utilizable a los fines de los objetivos del problema, puede variar o no, con el tiempo. Por ejemplo, que a partir de una cierta fecha haya agua comprometida para otro uso, disposiciones legales, etc.

II.6-d La solución del problema y su estabilidad :

La solución al problema planteado será el conjunto de valores de l_{ik} y P_{ik} que minimice el valor de la función objetivo, o sea, la secuencia óptima de proyectos (dada por

los I_{ik}) y el esquema global de distribución de agua (dado por los P_{ik}).

Como en todo problema de optimización, es altamente conveniente tener una clara idea de la estabilidad de la solución. Para ello es necesario realizar análisis de sensibilidad. Estos se pueden hacer con respecto a elementos aislados o con respecto a grupos de elementos. Por ejemplo, se puede estudiar la estabilidad de la solución óptima ante variaciones de los costos fijos de los proyectos, variaciones del precio de la energía de bombeo, o diferentes estimaciones de las futuras demandas de aguas. El modelo se presta también al análisis de sensibilidad con respecto a la tasa de interés, y a la calidad de la información hidrológica.

III. OPTIMO ITINERARIO DE OBRAS PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA A LA REGION METROPOLITANA VALENCIA-MARACAY

III.1 Definición del Problema

En la cuenca del Lago de Valencia se ha venido desarro-
llando un complejo urbano compuesto de dos ciudades centrales : Va -
lencia y Maracay, y de 15 poblaciones menores. Estos dos polos de -
desarrollo, por su situación dentro de la geografía nacional, poseen ex-
traordinarias ventajas para la instalación de industrias manufactureras. -
La dinámica de estos centros ha inducido el crecimiento de todas las -
poblaciones situadas en sus alrededores y su influencia predominante se
extiende hasta las áreas urbanas asentadas en los valles de Aragua.

El crecimiento demográfico de la zona en estudio alcanza
rá, de acuerdo a las proyecciones de COPLANARH, a más de 2 mi -
llones de habitantes en el año 2000. El desarrollo industrial registra -
do en los últimos años ha sido significativamente alto, y se espera que
esta zona sea la segunda en importancia después del Distrito Federal. -
Este gran crecimiento, conjuntamente con el fuerte desarrollo agrícola -
de los valles de Aragua y de los alrededores del Lago de Valencia, ha
traído como consecuencia un desequilibrio del balance hídrico. Esto se
debe al intenso uso de las fuentes superficiales que drenan hacia él y a
la extracción intensiva del agua subterránea de los acuíferos adyacentes.

La cuenca del Lago de Valencia no desagua superficial -
mente, lo cual agrega al problema del desequilibrio hídrico, el de la -
contaminación. Es así que últimamente el Instituto Nacional de Obras
Sanitarias (INOS) ha debido clausurar pozos que se encontraban en -

Las proximidades del Lago, por haberse presentado en ellos intrusión de agua del Lago, cuya calidad no era potable.

Los recursos de agua de la cuenca del Lago de Valencia fueron estudiados por la Oficina de Planeamiento de la Dirección General de Recursos Hidráulicos del Ministerio de Obras Públicas (1). Estos recursos están formados por fuentes propias de las cuencas y por disponibilidades exógenas.

De los afluentes al Lago de Valencia, el principal es el río Aragua, y está aprovechado al máximo. Otras dos fuentes pueden ser de interés, aún cuando sus rendimientos son relativamente bajo: el sitio de presa Las Dos Bocas en el río Maruría, y el de Santa Rosalía en el río Noguera. Esta última fuente, por quedar en las cercanías de Guigue se ha considerado, para los efectos del modelo, como una fuente comprometida para el abastecimiento de la región urbana ubicada contiguamente al Sur del Lago; se estima que el caudal garantizado por esta última alternativa es suficiente para abastecer la región urbana antes señalada, razón por la cual dicha zona no fue considerada en el modelo. Todos los otros afluentes propios de la cuenca son de menor disponibilidad y su aprovechamiento exigiría la construcción de un número elevado de pequeñas obras de altos costos de construcción, operación y administración. En virtud de ello, se considera que su explotación no es factible económicamente.

Los acuíferos que rodean el Lago son en la actualidad la fuente principal de abastecimiento para usos urbanos; sin embargo, debi-

(1) POSEWITZ, G. Estudio de las Alternativas para el Abastecimiento de Agua en la Cuenca del Lago de Valencia, Caracas 1972.

do al uso intensivo de que han sido objeto en los últimos años, actualmente no es posible aumentar de manera significativa la extracción de agua subterránea.

En el estudio antes señalado (1), se han reconocido 13 fuentes externas de abastecimiento, todas de aguas superficiales. No se reconocieron nuevas fuentes de aguas subterráneas. En dicho estudio, de las 13 fuentes reportadas se descartan algunas como alternativas para la solución del problema de abastecimiento de la Región Metropolitana Valencia-Maracay. En efecto, el sitio de presa "Hacienda Barrios", en la cuenca alta del río Tuy, tiene comprometidas sus aguas para el abastecimiento de la zona urbana Turmero-La Victoria, por lo que esta zona tampoco fue incluida en el modelo. El sitio de presa Guaipo, en el río Pao de Zarate, fue descartado por estar comprometidas sus aguas para el embalse Camatagua. Por otra parte, desde el sitio de presa Las Vegas, en la cuenca alta del río Guárico, no se podrá transferir agua hacia la cuenca del Lago de Valencia después de 1985, fecha en la cual está comprometida en su totalidad con su propia cuenca; en todo caso se estima que continuaría siendo fuente de abastecimiento de Villa de Cura y San Juan de Los Morros.

III.1.1 Centros de Consumo

La región metropolitana con problemas de abastecimiento quedaría definida así: la Ciudad y Distrito de Valencia al Nor-oeste del Lago; Guacara, San Joaquín y

(1) Posewitz, G., op. cit.

Mariara al Norte; Maracay, Palo Negro y Santa Cruz al Nor-este; y al Sur-este por Villa de Cura, ciudad ubicada en la línea de división de las aguas de la cuenca del Lago, y San Juan de Los Morros, ubicada fuera de dicha cuenca.

A los efectos del planteamiento del modelo, los centros de consumo se agruparon en 5 unidades, a saber :

- 1) El Distrito de Valencia
- 2) El conjunto Guacara-San Joaquín-Mariara
- 3) La concentración Maracay-Cagua-Sta. Cruz - Palo Negro
- 4) Villa de Cura
- 5) San Juan de Los Morros

III.1.2*

Consumo y fuentes de suministro actuales

En la actualidad las principales fuentes de abastecimiento de agua potable lo constituyen las aguas subterráneas y las aguas superficiales provenientes de los embalses Guataparo y Torito para Valencia, y los ríos Limón y Delicias para Maracay.

Los valores de los suministros actuales son los siguientes :

CUADRO N° 3.1

CONSUMOS DE AGUA (1972)

Región Metropolitana Valencia-Maracay

Valencia	1,408 m ³ /seg
Guacara y otros	0,142 m ³ /seg
Maracay	0,700 m ³ /seg
Villa de Cura	0,110 m ³ /seg
San Juan de Los Morros	0,160 m ³ /seg

Fuente : Posewitz, G. Op. Cit. y estimaciones propias.

No existe la posibilidad de incrementar los volúmenes extraídos de las diferentes fuentes que abastecen el consumo actual. Para los efectos del modelo se considerará que durante el horizonte de planeamiento estas fuentes seguirán suministrando los volúmenes reportados en el Cuadro N° 3.1.

III.1.3 Demandas Futuras

Las demandas de agua potable e industrial de los centros poblados han sido determinadas sobre la base de las prospecciones de dotaciones y población efectuadas por COPLANARH e INOS, obteniéndose de ello los siguientes resultados :

CUADRO N° 3.2

DEMANDAS DE AGUA POTABLE E INDUSTRIAL - AÑOS 1970-2000 (m³/seg)

Región Metropolitana Valencia-Maracay

Hipótesis : COPLANARH

Año	Valencia	Guacara	S. Joaquín	Mariara	Maracay	Villa de Cura	S. Juan Morros
1970	1,623	0,085	0,018	0,039	1,247	0,141	0,246
1975	2,282	0,111	0,029	0,053	1,871	0,216	0,317
1980	2,941	0,138	0,039	0,066	2,495	0,290	0,387
1985	4,124	0,184	0,054	0,099	3,402	0,391	0,487
1990	5,306	0,230	0,068	0,131	4,309	0,492	0,587
1995	7,122	0,309	0,097	0,174	5,675	0,673	0,756
2000	8,938	0,398	0,126	0,217	7,040	0,854	0,924

Fuente : Posewitz, G. op. cit. págs. 7 y 8

CUADRO N° 3.3

DEMANDAS DE AGUA POTABLE E INDUSTRIAL - AÑOS 1970-2000 (m³/seg)

Región Metropolitana Valencia-Maracay

Hipótesis : INOS

Año	Valencia	Guacara	S. Joaquín	Mariara	Maracay	Villa de Cura	S. Juan Morros
1970	0,900	0,085	0,018	0,039	0,949	0,105	0,130
1975	1,390	0,111	0,029	0,053	1,372	0,133	0,178
1980	1,790	0,138	0,039	0,066	1,795	0,160	0,225
1985	2,480	0,184	0,054	0,099	2,469	0,203	0,318
1990	3,170	0,230	0,068	0,131	3,143	0,245	0,410
1995	4,185	0,309	0,097	0,174	4,117	0,318	0,545
2000	5,200	0,398	0,126	0,217	5,090	0,390	0,680

Fuente : Posewitz, G. op. cit. págs. 10 y 11

CUADRO N° 3.4

DEFICITS DE AGUA - AÑOS 1975-2000 (m³/seg)

Región Metropolitana Valencia-Maracay

Hipótesis: COPLANARH e INOS

Año	Valencia		Guacara y otras 1/		Maracay		Villa de Cura		San Juan de Los Morros	
	Coplanarh	INOS	Coplanarh	INOS	Coplanarh	INOS	Coplanarh	INOS	Coplanarh	INOS
1975	0,874	0,191	0,051	0,051	1,171	0,672	0,106	0,025	0,137	0,033
1980	1,533	0,382	0,101	0,101	1,795	1,095	0,180	0,050	0,207	0,065
1985	2,716	1,072	0,195	0,195	2,702	1,769	0,281	0,093	0,307	0,158
1990	3,898	1,762	0,287	0,287	3,609	2,443	0,382	0,135	0,407	0,250
1995	5,714	2,777	0,443	0,443	4,975	3,417	0,563	0,208	0,576	0,385
2000	7,530	3,792	0,599	0,599	6,340	4,390	0,744	0,280	0,744	0,520

1/ Para esta unidad no se contaba con datos del INOS. Se han supuesto iguales a las estimaciones de COPLANARH

Fuente: Cuadros anteriores

En el Cuadro N° 3.3, se reportaron valores para las ciudades Guacara, San Joaquín y Mariara, iguales a los de COPLANARH, por cuanto no se dispone de estimaciones propias del INOS.

III.1.4 Déficits

Si a las demandas proyectadas se les sustrae aquellos volúmenes que se supone seguirán siendo abastecidos por las fuentes actuales, se tienen los déficits de agua para cada centro de consumo, los cuales deben ser cubiertos con las obras objeto de la programación. En el Cuadro N° 3.4 se muestra para cada fecha de control (1) los déficits correspondientes a las hipótesis de demanda utilizadas.

III.2 Alternativas de abastecimiento

III.2.1 Introducción

De las fuentes reconocidas en el informe mencionado anteriormente (1), se han utilizado en este trabajo once sitios de presas, desechándose los otros, según se explicó antes, bien por razones de costos, o por estar comprometidos para usos específicos. Aquí se han usado la información y estimaciones preliminares del estudio referido, si bien se han ajustado y corregido algunos costos y diseños allí indicados, especialmente los diámetros de las tuberías de aducción.

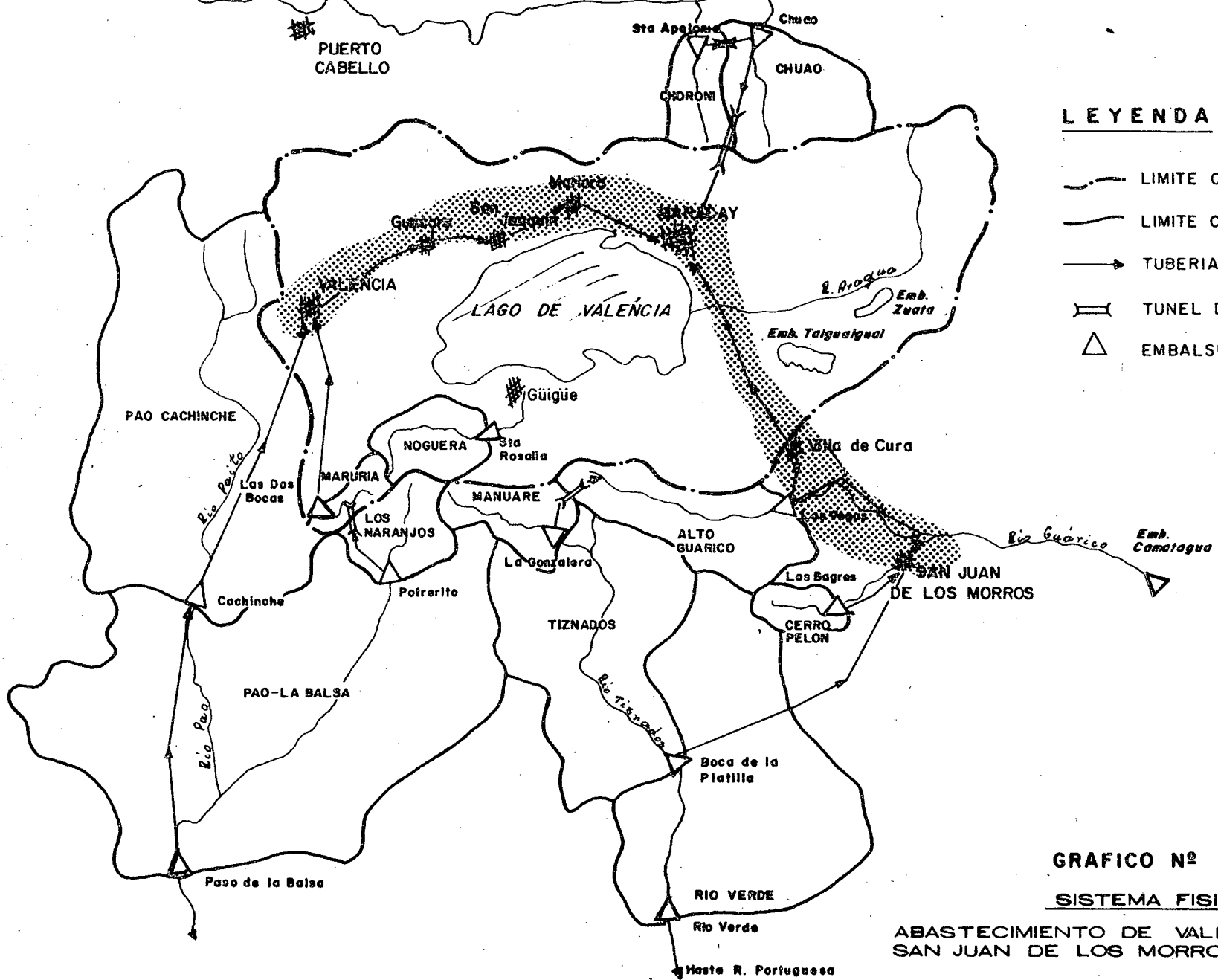
Se debe mencionar que los diseños utilizados en el modelo corresponden a una visión preliminar sobre el comportamiento global del sistema, y son de gran utilidad como una primera aproximación; posteriormente se deben ajustar como producto del análisis de los primeros resultados.

Más del 80% de los sitios de presa se encuentran fuera de la cuenca de drenaje del Lago de Valencia. Es necesario en todos esos casos bombear el agua para salvar las alturas divisorias de dicha cuenca.

En el gráfico 3.1 se indica esquemáticamente la ubicación de los sitios de presa. En el Esquema General

(1) Posewitz, G. op. cit.

MAR CARIBE



LEYENDA

- LIMITE CUENCA LAGO VALENCIA
- LIMITE CUENCAS VECINAS
- TUBERIAS DE ADUCCION
- ⌈⌋ TUNEL DE ADUCCION
- △ EMBALSE

GRAFICO N° 3-1

SISTEMA FISICO

**ABASTECIMIENTO DE VALENCIA - MARACAY -
SAN JUAN DE LOS MORROS**

de Abastecimiento de Agua Potable para la Región Metropolitana Valencia-Maracay (Gráfico 3.2), aparecen indicados los costos preliminares de cada una de las alternativas (1). Conviene hacer notar que para una misma fuente o aducción, se puede considerar más de una alternativa de abastecimiento. Estas alternativas se diferenciarán en general por el diámetro de la tubería de aducción, por el máximo caudal a transferir, y en consecuencia por los costos de inversión y de energía.

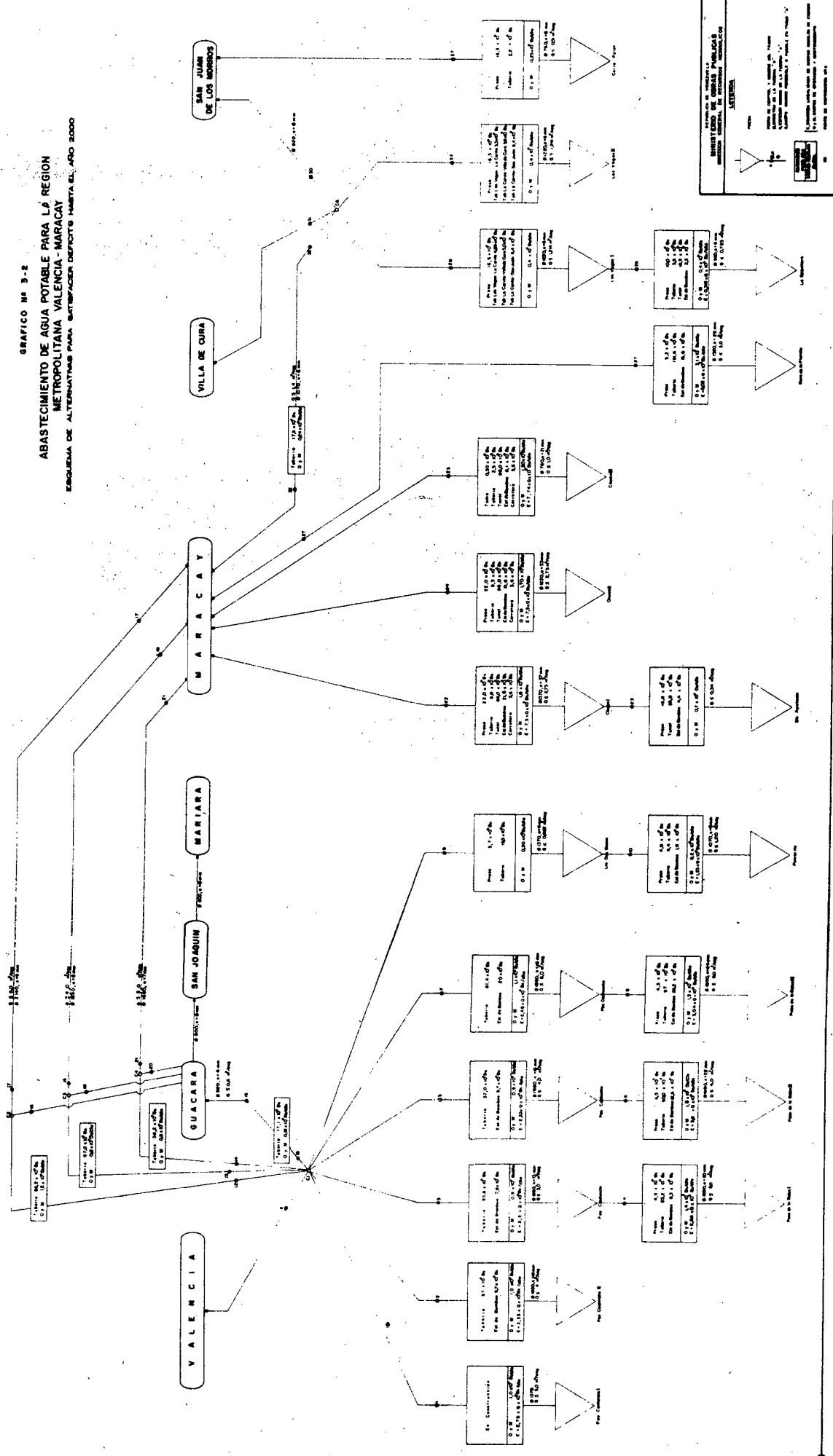
En los diseños preliminares de los diámetros de tuberías de las diferentes aducciones, se han estimado (a falta de perfiles longitudinales del trazado) tres tramos de igual longitud, con cargas de presión equivalentes a 1, 2/3 y 1/3 de la altura máxima de carga, y los costos se han calculado considerando dicho criterio. En las descripciones que a continuación se indican, sólo se mencionará el mayor de los diámetros y/o espesores.

III.2.2 Río Pao en Cachinche

III.2.2.1 Proyecto 01: Pao-Cachinche I. Actualmente se encuentra en construcción sobre el río Pao, en Cachinche, una presa de tierra de 52 m de altura, con una capacidad neta de $165 \times 10^6 \text{ m}^3$, y en ejecución la colocación

(1) Se anexa al informe una ampliación de este gráfico

GRAFICO Nº 3-2
ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE PARA LA REGION METROPOLITANA VALENCIA-MARACAY
 ESQUEMA DE ALTERNATIVAS PARA SATISFACER DEFICIT HASTA EL AÑO 2000



ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE PARA LA REGION METROPOLITANA VALENCIA-MARACAY
 ESCHEMA DE ALTERNATIVAS PARA SATISFACER DEFICIT HASTA EL AÑO 2000

de una tubería desde el embalse hasta Valencia. Esta será constituida por un primer tramo de tubería a presión de \varnothing 1950 mm y 3 Km de longitud, y por un segundo tramo de \varnothing 1370 mm y 32 Km de longitud diseñado para llevar $3 \text{ m}^3/\text{s}$ por gravedad.

III.2.2.2 Proyecto 02: Pao-Cachinche II. Desde el punto de vista de ingeniería civil, este proyecto sería la segunda etapa del anterior, puesto que consiste en colocar una tubería paralela al segundo tramo de la tubería que en este momento se está colocando entre el embalse Pao Cachinche y Valencia. Ya que el embalse Pao Cachinche se está construyendo para un gasto regulado de $6 \text{ m}^3/\text{s}$, le tocaría al proyecto Pao Cachinche II llevar por gravedad $3 \text{ m}^3/\text{s}$, y por lo tanto se eligió un diámetro \varnothing 1370 mm, con una longitud de 32 Km.

III.2.3 Río Pao en Paso de La Balsa

En este caso se han considerado para un mismo sitio, río Pao en Paso de La Balsa, tres alternativas independientes, diferenciadas fundamentalmente en el diámetro de las tuberías de aducción y en consecuencia en el caudal máximo a transportar, lo cual incide en los costos de energía.

En estas tres alternativas, las aguas del río Pao en Paso de La Balsa se bombearían hasta el embalse Cachinche, desde el cual seguirían hasta Valencia por otra tubería de 35 Km. Se incluyen por lo tanto dentro de este proyecto dos secciones de aducción: una sección sería Paso de La Balsa-Cachinche, y la segunda sería Cachinche-Valencia.

En las tres alternativas se mantuvieron constantes el sitio y altura de presa, con una capacidad útil de $520 \times 10^6 \text{ m}^3$, estimándose que el agua que no se utilice podría aprovecharse en el riego de tierras agrícolas, ubicadas aguas abajo de Paso de La Balsa. Sin embargo, a este nivel preliminar, se estimó innecesario hacer un prorrateo de los costos entre agua potable y riego, dado que el costo de la presa representa un porcentaje muy pequeño del total (ver Gráfico 3.2).

En los puntos que siguen se reportan los diseños preliminares de las alternativas correspondientes a Paso de La Balsa.

III.2.3.1 Proyecto 03: Paso de La Balsa I

Tubería Paso de La Balsa-Cachinche: $L1 = 42 \text{ Km}$
 $\varnothing 1 = 1980 \text{ mm}, e = 20 \text{ mm}$

Tubería Cachinche-Valencia: $L2 = 32 \text{ Km}$
 $\varnothing 2 = 1980 \text{ mm}, e = 15 \text{ mm}$

$Q \text{ max} = 3,0 \text{ m}^3/\text{seg}$

III.2.3.2 Proyecto 05: Paso de La Balsa II

Tubería Paso de La Balsa-Cachinche : L1 = 42 Km
 $\varnothing 1 = 1980$ mm, e = 22 mm

Tubería Cachinche-Valencia : L2 = 32 Km
 $\varnothing 2 = 1980$ mm, e = 16 mm

Q max = 4,0 m³/seg

III.2.3.3 Proyecto 07: Paso de La Balsa III

Tubería Paso de La Balsa-Cachinche : L1 = 42 Km
 $\varnothing 1 = 1980$ mm, e = 24 mm

Tubería Cachinche-Valencia : L2 = 32 Km
 $\varnothing 2 = 1980$ mm, e = 18 mm

Q max = 6,0 m³/seg

III.2.4 Río Maruria en Las Dos Bocas

III.2.4.1 Proyecto 09: Las Dos Bocas. En esta alternativa se considera una presa ubicada en el río - Maruria, en el sitio denominado Las Dos Bocas. La aducción sería una tubería de $\varnothing = 1.370$ mm y L = 24 Km. El diámetro fue proyectado previendo la posibilidad de llevar en una - segunda etapa las aguas del embalse Potrerito, que se ubicaría sobre el río Los Naranjos. En el diseño preliminar del diámetro de esta aducción se vió la conveniencia de conducir el agua por gravedad hasta Valencia.

El aporte máximo del Embalse Las Bocas sería de 0,682 m³/seg.

III.2.6.3 Proyecto 14 :

Tubería Valencia-
Maracay III : $\varnothing = 1650 \text{ mm}$
 $Q \text{ max} = 3.0 \text{ m}^3/\text{seg}$

III.2.7 Aducción Valencia-Mariara

III.2.7.1 Proyecto 15 : Tubería Valencia-Mariara. Esta alternativa no considera la conexión Valencia-Maracay. La tubería en este caso tendría un diametro de $\varnothing = 920 \text{ mm}$ y Longitud $L = 34 \text{ Km}$, lo que permitiría abastecer por gravedad a Guacara, San Joaquín y Mariara. El gasto máximo es de $1,3 \text{ m}^3/\text{seg}$.

III.2.8 Río Chuao

En el río Chuao hay un sitio de presa factible aguas abajo de la desembocadura del río Sinamaica. El acceso a este lugar es difícil y la aducción a la cuenca del Lago de Valencia implica un bombeo de 640 m , un túnel de 12.400 m y una tubería de 3 Km (no se estimó necesario a nivel preliminar, el estudio de una chimenea de equilibrio). Se consideraron tres alternativas :

III.2.8.1 Proyecto 22 : Chuao I. Esta alternativa considera en una primera etapa la construcción de un embalse sobre el río Chuao, de modo de tener un rendimiento garantizado de $2,73 \text{ m}^3/\text{seg}$ y, en una segunda etapa, recibir la

descarga de las aguas del embalse Santa Apolonia que se encuentra en una pequeña cuenca vecina; contempla además una tubería de $\varnothing = 1370$ mm, $e = 37$ mm y $L = 3$ Km, y un túnel de 12,4 Km.

El caudal máximo que se podría suministrar en la primera etapa sería de $2,73$ m³/seg; en la segunda etapa, con el aporte de Santa Apolonia ($0,54$ m³/seg), el caudal máximo sería de $3,27$ m³/seg.

III.2.8.2 Proyecto 24: Chuao II. Esta alternativa de secha la posibilidad de la construcción del embalse Santa Apolonia, y por lo tanto el diámetro de la tubería de impulsión fue diseñado para un caudal máximo de $2,73$ m³/seg. Considera entonces 3 Km de tubería de $\varnothing = 1220$ mm y $e = 33$ mm, y, igualmente que en el caso anterior, un túnel de 12,4 Km.

III.2.8.3 Proyecto 25: Chuao III. En este caso se contempla una toma directa en el río Chuao, localizada en el mismo sitio de presa de los dos casos anteriores. Se estima que se podría tener un gasto garantizado de $1,0$ m³/seg. Al igual que en los casos anteriores, se necesitan 3 Km de tubería de impulsión aún cuando de

Maracay. Para efectos del modelo se conside
ró que esta aducción iba directamente a Mara
cay, o sea, no haría entregas en puntos inter
medios de su recorrido.

Se eligieron los siguientes diseños preli
minares :

Tubería a presión :

Boca de La Platilla- L = 75 Km
Villa de Cura : $\varnothing = 1520$ mm, e = 29 mm

Tubería por gravedad :

Villa de Cura-Mara - L = 30 Km
cay : $\varnothing 1520$ mm, e = 6 mm

III.2.11 Río Guárico en Las Vegas

En la cuenca alta del río Guárico, 6 Km aguas
arriba de la confluencia de los ríos Guárico y Tucutunemo,
hay un sitio de presa desde donde se puede conducir por gra
vedad las aguas hacia Villa de Cura, San Juan de Los Mo
rros y Maracay.

Para este sitio de presa se cuenta con dos alter
nativas de interés. (1)

III.2.11.1 Proyecto 28 : Las Vegas I. Esta alternativa
contempla la posibilidad de una operación con
junta con la presa La Gonzalera (también en
estudio) de modo que, a los $1,214$ m³/seg -

(1) Actualmente el INOS, ha llamado a licitación para la construcción de la presa y las aducciones a Villa de Cura y San Juan de Los Morros.

III.2.12.1 Proyecto 32: Tubería Villa de Cura-Maracay. La aducción Villa de Cura-Maracay se haría - mediante una tubería de 30 Km de longitud, de 1070 mm de diámetro y 6 mm de espesor, lo que permitiría conducir por gravedad un caudal máximo de $1,8 \text{ m}^3/\text{seg}$.

III.2.13 Río Manuare

El río Manuare se encuentra en una cuenca vecina a la cuenca alta del Guárico. Aquí se ha ubicado un sitio de presa que da lugar a una nueva alternativa.

III.2.13.1 Proyecto 29: La Gonzalera. Este proyecto considera la transferencia de $0,783 \text{ m}^3/\text{seg}$ - al embalse Las Vegas, mediante una tubería - de $L = 3,6 \text{ Km}$, $\varnothing = 920 \text{ mm}$, y $e = 6 \text{ mm}$, y un túnel de 2.7 Km .

Se debe mencionar que el río Manuare no forma parte de la cuenca del río Guárico y por ello sus aguas pueden legítimamente abastecer a Maracay, aún después de 1985.

III.2.14 Río Cerro Pelón en Los Bagres

III.2.14.1 Proyecto 37: Los Bagres. Este embalse tiene una hoya muy pequeña y su rendimiento es de $0,510 \text{ m}^3/\text{seg}$. Sin embargo se ha considerado como alternativa, dada su corta distancia a San Juan de Los Morros. El sitio de -

presa queda en el río Cerro Pelón, en el sitio denominado Los Bagres. Se construiría una tubería del embalse hasta San Juan de Los Muros con las siguientes características : $\varnothing = 760$ mm y $L = 7$ Km.

III.2.15 Otras Alternativas

Según se señaló, existen otros sitios de presa adicionales a los aquí discutidos, pero fueron desechados por ser estas alternativas evidentemente más costosas en el análisis preliminar de la información existente.

Otra posibilidad que no ha sido considerada en este estudio es el uso de las aguas del Lago de Valencia. Este inmenso embalse natural, cercano a todos los centros de consumo de la RMVM, parece ser a priori un elemento obvio de la solución del problema de suministro de agua. Sin embargo, su utilización está condicionada por la adopción de una legislación muy estricta en cuanto a la depuración, previa a su ingreso al Lago, de todas las aguas negras municipales e industriales de las poblaciones cuyos efluentes descargan en él. Una vez asegurado tal control, se piensa que no sería necesario un tratamiento muy costoso del agua del Lago a fines de consumo humano, ya que mezclado con el agua de otras fuentes, se podrían alcanzar las normas de calidad a un precio relativamente bajo. La inclusión del Lago de Valencia como alternativa de abastecimiento no haría más complejo el planteamiento y solución.

del problema.

III.2.16 Listado de Proyectos

Los proyectos considerados en el modelo, se presentan en forma resumida en el siguiente listado :

<u>Nº</u>	<u>Proyecto</u>	<u>Capac. Máx.</u> <u>(m³/seg)</u>	<u>Diám-esp. Tub.</u> <u>(mm) Ø - e</u>
01	Pao-Cachinche I	3,00	1370
02	Pao-Cachinche II	4,00	1980 - 16
03	Paso de La Balsa I	3,00	1980 - 20 y 15
05	Paso de La Balsa II	4,00	1980 - 22 y 16
07	Paso de La Balsa III	6,00	1980 - 24 y 18
09	Las Dos Bocas	0,682	1370 - 6
10	Potrerito	1,210	1070 - 6
12	Tubería Valencia-Maracay I	6,00	2140 - 9
13	Tubería Valencia-Maracay II	4,00	1830 - 7
14	Tubería Valencia-Maracay III	3,00	1650 - 7
15	Tubería Valencia-Mariara	0,60	920 - 6
22	Chuao I	2,73	1370 - 37
23	Santa Apolonia	0,54	-
24	Chuao II	2,73	1220 - 33
25	Chuao III	1,00	760 - 21
27	Boca de La Platilla	3,00	1520 - 29
28	Las Vegas I	1,214	1220 - 6
29	La Gonzalera	0,783	920 - 6
32	Tubería Villa de Cura-Maracay	1,400	1070 - 6
33	Las Vegas II	1,214	1220 - 6
37	Cerro Pelón	0,510	760 - 6

III.3 El modelo para la Región Metropolitana Valencia-Maracay

En los puntos anteriores se han presentado las demandas de agua potable, las cuales son función del tiempo y del centro de consumo. Por otra parte, se ha señalado un conjunto amplio de alternativas factibles que pueden satisfacer dichas demandas hasta el año 2000. El problema de planificación es encontrar aquél ordenamiento en el tiempo, que minimice el valor actual de las inversiones necesarias y del flujo de

costos adicionales y que permita la construcción oportuna de las obras y la operación eficiente del sistema, garantizando el abastecimiento de agua potable.

La gran mayoría de las fuentes (embalse), se encuentran fuera de la cuenca del Lago de Valencia, y los costos de energía de bombeo en muchos casos son significativamente más altos que la inversión fija; esto indica la importancia que tienen los costos de operación del sistema en la solución.

El elevado número de proyectos, la variedad de ordenamientos de construcción posibles en el tiempo y la diversidad de combinaciones en la forma de operarlos, hacen a este problema demasiado complejo como para resolverlo sin la ayuda de una computadora.

A continuación se describen, para el caso específico de la aplicación del modelo de optimización para la Región Valencia-Maracay, los aspectos particulares más importantes.

III.3.1 Centros de Consumo

Según se señaló, se consideran 5 centros de consumo, cuyo listado se encuentra en el punto III.1.1.

III.3.2 Horizonte de Planificación

Se tomó como horizonte de planificación el año 2000.

III.3.3 Fechas de control

De acuerdo al horizonte de planificación, se tomaron seis fechas de control (correspondientes a los valores

res de k). Estas son :

<u>k</u>	<u>Años</u>	<u>Fecha representativa</u>
1	1974-75	1975
2	1976-80	1980
3	1981-85	1985
4	1986-90	1990
5	1991-95	1995
6	1996 - 2000	2000

Para estas fechas representativas, se cumple en el modelo la satisfacción de las restricciones de demanda.

III.3.4 Año de construcción

El momento en que se considere concentrada la inversión de un proyecto es 2,5 años antes de la fecha de control correspondiente, a excepción del primer período, en cuyo caso es tan sólo 1 año antes de la fecha de control.

III.3.5 Demandas

Para cada centro de consumo se han establecido tres hipótesis de demanda : COPLANARH, INOS y un PROMEDIO de ambas. Estas demandas se refieren a los dé ficits (demanda proyectada menos cantidad suministrada actualmente). Los valores correspondientes a cada centro de consumo y fecha de control se reportan en el punto III.1.4.

No se permiten holguras en la satisfacción de esas demandas de agua, ya que deben de ser cubiertas totalmente, en las fechas de control.

III.3.6 Proyectos

En la descripción de las alternativas de abastecimientos se presentó al final (punto III.2.16) un listado de los proyectos a ser considerados en el modelo; son 21 proyectos en total.

III.3.7 Relaciones de Dependencia ✓

Entre los proyectos considerados se establecieron las siguientes relaciones de dependencia :

Paso La Balsa I,
II y III : no anterior a Pao Cachinche I ó II
Potrerito : no anterior a Las Dos Bocas
Santa Apolonia : no anterior a Chuao I
La Gonzalera : no anterior a Las Vegas I
Tubería Villa de
Cura-Maracay : no anterior a Las Vegas I ó II

III.3.8 Proyectos Excluyentes ✓

Chuao I, Chuao II y Chuao III
Las Vegas I y Las Vegas II

III.3.9 Continuidad de flujo ✓

Existen en el modelo cinco nudos. En ellos se deben cumplir la restricción de continuidad de flujo. Estos nudos son (Véase Gráfico 3.2) :

C1 entran : Proyectos : 01, 02, 03, 05, 07, 09 y 10
salen : Proyectos : 12, 13, 14 y 15
Derivación 11 a Valencia

- C2 derivación 16 del Proyecto 12 a Guacara-San Joaquín-Mariara
- C3 derivación 18 del Proyecto 13 a Guacara-San Joaquín-Mariara
- C4 derivación 20 del Proyecto 14 a Guacara-San Joaquín-Mariara
- C6 entran : Proyectos : 28, 29 y 33
salen : Proyecto : 32
Derivación 31 del Proyecto 28 ó 33 a Villa de Cura
Derivación 30 del Proyecto 28 ó 33 a San Juan

III.3.10 Valor de epsilon en las Ecuaciones de Gastos

Para efectos del tratamiento del problema de discontinuidad en las ecuaciones de gastos, se fijó para todos los proyectos un valor de epsilon igual a 1 lt/seg.

III.3.11 Restricciones Legales o Institucionales

Una restricción particular que se presenta en este caso específico y que hubo de ser incluida en el modelo, es la condición legal de no utilización de las aguas del río Guárico en el embalse Las Vegas, para el abastecimiento de Maracay, después de 1985. Esta condición no afecta la libre distribución de las aguas de La Gonzalera, las cuales necesariamente transitan por Las Vegas. Esta distribución de aguas quedaría restringida de la siguiente manera :

$$Q_{32k} \leq Q_{29k} \quad (\text{para } K = 4, 5 \text{ y } 6)$$

Sin embargo pudiera darse el caso de que la tubería Villa de Cura-Maracay (Q_{32k}) estuviese construída; bajo estas circunstancias la anterior ecuación obligaría en forma arbitraria a Q_{29k} a tomar un valor mayor o igual que epsilon (es decir, la construcción del embalse La Gonzalera), puesto que de acuerdo al tratamiento del problema de la discontinuidad, Q_{32k} sería por lo menos igual a epsilon.

Para evitar el anterior inconveniente, la ecuación se modificó de la siguiente forma :

$$Q_{32k} - \epsilon \leq Q_{29k} \quad (\text{para } K = 4, 5 \text{ y } 6)$$

III.3.12 Proyectos en Ejecución

Para los proyectos en ejecución en estos momentos (Pao-Cachinche I) se consideró, dentro de los costos fijos, tan sólo los de administración y mantenimiento y los de reposición.

III.3.13 Restricciones de Capacidad

Naturalmente cada proyecto tiene su capacidad máxima, la cual es función del diseño y de las restricciones legales o institucionales, según se apuntó.

III.3.14 Tasa de interés

La tasa de interés del capital, usada para la homogeneización de la moneda, fue de 8%.

III.3.15 Costos

Los costos utilizados en la construcción de la función objetivo, se encuentran indicados en el Gráfico 3.2.

III.4 Análisis de Resultados y Sensibilidad

III.4.1 Itinerarios óptimos

En el Cuadro N° 3.5 se presenta, para las tres hipótesis de demanda, el listado de los proyectos que deben estar construídos en las fechas de control correspondiente, a fin de garantizar el suministro de agua en las cantidades demandadas en cada centro de consumo.

El hecho de que la hipótesis COPLANARH sea consistentemente más alta que la del INOS se evidencia por cuanto, bajo ella, es necesario construir un mayor número de proyectos y en todo momento la capacidad del sistema debe ser igual o mayor. La hipótesis PROMEDIO muestra, naturalmente, un comportamiento intermedio.

Hay diferencias importantes en el valor de la función objetivo para las diferentes hipótesis. Si se toma $i = 8\%$ y el precio de KWH = B^s 0,75, el costo total actualizado va desde 181 millones de bolívares (Hip. INOS) hasta 299 millones (Hip. COPLANARH), o sea una diferencia del orden del 60% en el valor total actualizado, lo cual deja ver la gran importancia que tiene el trabajar con información lo más ajustada posible en términos de estimaciones de la demanda.

CUADRO N° 3.5

ITINERARIOS OPTIMOS DE INVERSIONES. TRES HIPOTESIS DE DEMANDA

Región Metropolitana Valencia-Maracay

Fecha de Control	H I P O T E S I S D E D E M A N D A			
	COPLANARH	PROMEDIO	INOS	
	Proyecto	N°	Proyecto	
		N°	Proyecto	
1975	Pao-Cachinche I	01	Pao-Cachinche I	01
	Tub. Valencia-Maracay II	13	Tub. Valencia-Maracay II	13
	Las Vegas I	28	Las Vegas I	33
	Tub. Villa de Cura-Maracay	32	Tub. Villa de Cura-Maracay	32
1980				
1985	Pao-Cachinche II	02	Pao-Cachinche II	02
1990	Las Dos Bocas	09	Las Dos Bocas	09
	Potrerito	10	Potrerito	10
1995	La Gonzalera	29	Chuao I	22
	Chuao II	24	Chuao II	02
2000	Cerro Pelón	37	La Gonzalera	29
	Paso de La Balsa II	05	Santa Aponia	23
			Chuao III	25

En las tres hipótesis se requiere de alguna aducción entre Valencia y Maracay. Dado que existen una serie de fuentes cercanas a Valencia y otras a Maracay, parece que la unión de estas dos poblaciones mediante un acueducto tendría un beneficio de tipo estratégico, adicionalmente a los beneficios que se derivan del suministro de agua en la forma en que las soluciones para las diferentes hipótesis - las plantean; en efecto, en el caso de que se retrase alguna obra o exista otra contingencia que entrabara el desenvolvimiento "normal" del esquema de aprovechamiento, esta interconexión permitiría pasar agua de la zona de Valencia a la de Maracay y eventualmente en sentido inverso. En el modelo, se consideró la posibilidad de flujo sólo en el sentido Valencia-Maracay; sin embargo, en un caso extremo resultaría relativamente simple hacer las modificaciones necesarias a fin de invertir el sentido del flujo.

La revisión del Cuadro N° 3.5 deja ver que en todas las soluciones hay una serie de proyectos que están excluidos. Estos son : Boca de La Platilla, Paso de La Balsa I y III, Tubería Valencia-Maracay I y III y Tubería - Valencia-Mariara.

Los Cuadros N° 3.6 al 3.8 señalan el programa de inversiones correspondientes a los itinerarios óptimos - señalados para cada hipótesis de demanda. Debe entenderse que tan sólo se incluyen las inversiones iniciales y las reposiciones de equipo de bombeo y tuberías, todo ello supuesto concentrado en los "años de construcción".

CUADRO N° 3.6

PROGRAMA DE INVERSIONES (*)

(millones de bolívares)

Hipótesis de Demanda : COPLANARH

Proyectos	N°	1974	1978	1983	1988	1993	1998
Pao-Cachinche I	01	(**)			9.7		
Las Vegas I	28	32.7					16.2
Tubería Villa de Cura-Maracay	32	17.5					17.5
Tubería Valencia-Maracay	13	67.0					67.0
Pao-Cachinche II	02			66.7			9.7
Las Dos Bocas	09				23.2		
Potrerito	10				11.1		
La Gonzalera	29					34.7	
Chuao II	24					138.5	
Cerro Pelón	37						18.5
Paso de La Balsa II	05						173.7
Totales:		117.2		66.7	44.0	173.2	302.6

(*) Todas las inversiones se suponen concentradas al 30 de junio del año respectivo, excepto para 1974, en donde están concentradas al 31 de diciembre.

(**) Este proyecto se encuentra actualmente en construcción.

CUADRO N° 3.7

PROGRAMA DE INVERSIONES (*)

(millones de bolívares)

Hipótesis de Demanda : PROMEDIO

Proyectos	N°	1974	1978	1983	1988	1993	1998
Pao-Cachinche I	01	(**)			9.7		
Las Vegas I	28	32.7					16.2
Villa de Cura-Maracay	32	17.5					17.5
Valencia-Maracay	13	67.0					67.0
Pao-Cachinche II	02			66.7			9.7
Las Dos Bocas	09				23.2		
Potrerito	10				11.1		
Chuaó I	22					140.0	
Santa Apolonia	23						56.2
La Gonzalera	29						34.7
Totales:		117.2		66.7	44.0	140.0	201.3

(*) Todas las inversiones se suponen concentradas al 30 de junio del año respectivo, excepto para 1974, en donde están concentradas al 31 de diciembre.

(**) Este proyecto se encuentra actualmente en construcción.

CUADRO N° 3.8
PROGRAMA DE INVERSIONES (*)
(millones de bolívares)

Hipótesis de Demanda : INOS

Proyecto	N°	1974	1978	1983	1988	1993	1998
Pao-Cachinche I	01	(**)			9.7		
Las Vegas II	33	30.0					13.5
Tubería Villa de Cura-Maracay	32	17.5					17.5
Tubería Valencia-Maracay II	13	67.0					67.0
Las Dos Bocas	09				23.2		
Potrerito	10				11.1		
Pao-Cachinche II	02					66.7	
Chuao III	25						100.7
T o t a l e s :		114.5			44.0	66.7	198.7

(*) Todas las inversiones se suponen concentradas al 30 de junio del año respectivo, excepto para 1974, en donde están concentradas al 31 de diciembre.

(**) Este proyecto se encuentra actualmente en construcción.

Se observa que en todas las alternativas hay la necesidad de construir en los primeros años una serie de proyectos, lo que es consecuencia de la necesidad de cubrir los déficits actuales. A continuación, hay una etapa intermedia de unos 10 - 15 años en la cual se puede decir que los requerimientos de inversión son relativamente bajos. Finalmente para 1993 y 1998 las necesidades de inversión vuelven a ser altas, particularmente en las hipótesis PROMEDIO y COPLANARH.

III.4.2 Modelos de Operación

En los Cuadros N° 3.9, 3.10 y 3.11 se presentan, para las correspondientes hipótesis de demanda, los modelos de operación para las fechas de control utilizadas. Según se ha señalado, la optimización no sólo consiste en definir la secuencia y fechas en que deben adelantarse las inversiones, sino también en qué forma debe distribuirse el agua. Así, en los cuadros referidos se indica el caudal que debe extraerse de cada proyecto en las fechas de control utilizadas (1). También se señala el porcentaje de aprovechamiento de la fuente respectiva, esto es, la proporción de la capacidad máxima que está siendo utilizada.

Se observa en los resultados para las tres hipótesis de demanda que el acueducto Valencia-Maracay se utiliza desde el primer período; sin embargo, el aprovechamien-

(1) Debe recordarse que se está trabajando con gastos medios anuales.

CUADRO N° 3.9

MODELO DE OPERACION. VALENCIA-MARACAY

Hipótesis de Demanda : COPLANARH

Alternativas	N°	PERIODO 1 74-75		PERIODO 2 76-80		PERIODO 3 81-85		PERIODO 4 86-90		PERIODO 5 91-95		PERIODO 6 96-200	
		Operación en 1975		Operación en 1980		Operación en 1985		Operación en 1990		Operación en 1995		Operación en 2000	
		l/seg	%	l/seg	%	l/seg	%	l/seg	%	l/seg	%	l/seg	%
Pao-Cachinche I	01	1.125	37	2.602	87	587	33	1.901	63	2.000	67 ^{a/}	2.000	67 ^{a/}
Las Vegas I	28	1.214	100	1.214	100	1.214	100	790	65	1.140	94	979	81
Tubería Villa de Cura-Maracay	32	971	69	827	59	626	45			784	56	784	56
Tubería Valencia-Maracay II	13	251	6	1.069	27	2.271	57	3.895	97	2.178	54	4.000	79
Pao-Cachinche II	02			4.000	100			4.000	100	4.000	100	4.000	100
Las Dos Bocas	09					682	100	682	100	682	100	682	100
Potrerito	10					1.210	100	1.210	100	1.210	100	1.210	100
La Gonzalera	29							783	100	783	100	783	100
Chuo II	24							2.456	90	2.456	90	2.156	77
Cerro Pelón	37											510	100
Paso de La Bal-sa II	05											3.638	91

^{a/} Estas cifras representan el porcentaje de aprovechamiento de la tubería solamente, dado que esta alternativa en conjunto con las Cachinche II aprovecha a 100% la capacidad del embalse.

CUADRO N° 3.10

MODELO DE OPERACION. VALENCIA-MARACAY

Hipótesis de Demanda : PROMEDIO

Alternativas	N°	PERIODO 1 74-75		PERIODO 2 76-80		PERIODO 3 81-85		PERIODO 4 86-90		PERIODO 5 91-95		PERIODO 6 96-2000	
		Operación en 1975		Operación en 1980		Operación en 1985		Operación en 1990		Operación en 1995		Operación en 2000	
		l/seg	%	l/seg	%	l/seg	%	l/seg	%	l/seg	%	l/seg	%
Pao-Cachinche I	01	584	19	1.541	51	250	8	2.000	67 ^a / _a	2.000	67 ^a / _a	2.000	67 ^a / _a
Las Vegas I	28	1.022	84	1.214	100	1.214	100	586	48	867	71	1.145	94
Tubería Villa de Cura-Maracay	32	872	62	963	69	794	57					783	56
Tubería Valencia- Maracay II	13	51	1	583	15	1.637	41	3.312	82	3.647	91	2.231	56
Pao-Cachinche II	02					3.531	88	4.000	100	4.000	100	4.000	100
Las Dos Bocas	09					682	100	682	100	682	100	682	100
Potrerito	10					1.210	100	1.210	100	1.210	100	1.210	100
Chuoao I	22									991	35	2.730	100
Santa Apolonia	23											219	41
La Gonzalero	29											783	100

a/ Estas cifras representan el porcentaje de aprovechamiento de la tubería solamente, dado que esta alternativa en conjunto con Pao-Cachinche II aprovecha a 100% la capacidad del embalse.

CUADRO N° 3.11

MODELO DE OPERACION. VALENCIA-MARACAY

Hipótesis de Demanda : INOS

Alternativas	N°	PERIODO 1 74-75		PERIODO 2 76-80		PERIODO 3 81-85		PERIODO 4 86-90		PERIODO 5 91-95		PERIODO 6 96-2000	
		Operación en 1975	%	Operación en 1980	%	Operación en 1985	%	Operación en 1990	%	Operación en 1995	%	Operación en 2000	%
		l/seg	%	l/seg	%	l/seg	%	l/seg	%	l/seg	%	l/seg	%
Pao-Cachinche I	01	242	8	483	16	2.073	69	2.599	87	744	25	2.000	67 ^{a/}
Las Vegas II	33	730	60	1.210	99	1.214	100	386	32	594	49	800	66
Tubería Villa de Cura-Maracay	32	672	48	1.095	78	963	69						
Tubería Valencia- Maracay II	13	51	1	101	2	1.001	24	2.729	68	3.859	97	4.000	100
Las Dos Bocas	09							682	100	682	100	682	100
Potrerito	10							1.210	100	1.210	100	1.210	100
Pao-Cachinche II	02									4.000	100	4.000	100
Chuco III	25											988	99

a/ Esta cifra representa el porcentaje de aprovechamiento de la tubería solamente, dado que esta alternativa en conjunto con Pao-Cachinche II aprovecha a 100% la capacidad del embalse.

En los Cuadros N° 3.9, 3.10 y 3.11 se destaca que el aprovechamiento de las diferentes fuentes no sigue ningún patrón regular, ya que puede subir o bajar de una fecha de control a la otra. Aún más, si se analiza el comportamiento de la tubería Villa de Cura-Maracay (hipótesis INOS) se observa el caso extremo de que un proyecto empieza a ser utilizado y, pasado un tiempo relativamente breve -en términos de su vida útil-, deja de ser empleado totalmente. Esta misma tubería en las hipótesis COPLANARH y PROMEDIO, después de haber sido utilizada por un cierto tiempo, permanece ociosa y finalmente vuelve a ser empleada para la conducción de agua.

Otro ejemplo que ilustra lo anterior se tiene, por ejemplo, en la demanda INOS con Las Vegas II que baja a un 32% de aprovechamiento para 1990 y luego vuelve a subir en las fechas de control subsiguientes.

Este tipo de operación, aparentemente ineficiente, resulta de la puesta en servicio de nuevas obras cuyos costos de operación son menores. Puesto que el objetivo es la minimización del costo global para todo el período bajo análisis, tales situaciones son perfectamente explicables y corresponden en efecto a la solución óptima.

Comoquiera que los Cuadros N° 3.9 al 3.11 presentan la información sobre la operación en forma global (sin señalamiento de destinos), se estimó conveniente ilustrar la forma en la cual se debe conducir el flujo de gastos referidos en los años de control, a través de la red de distribu-

ción disponible para esos años, de acuerdo a la secuencia óptima de inversiones para cada hipótesis de demanda. Al efecto se han preparado los Gráficos N° 3.3, 3.4 y 3.5 en los cuales se muestra en forma esquemática, aunque con un mayor grado de detalle el modelo de operación para cada año de control en las tres hipótesis consideradas.

Debe señalarse que, de acuerdo al modelo, en donde se ha trabajado con funciones linealizadas de energía, un proyecto con un costo de bombeo menor que otro, será aprovechado al máximo. En la realidad, estas son funciones cúbicas, según se señaló, por lo que dicha operación no es necesariamente la óptima, aún cuando estará cercana a ella; sin embargo, se estima que los resultados son valederos como una primera aproximación, sujeta a posteriores chequeos sobre las magnitudes precisas que minimicen los costos de distribución.

III.4.3 Análisis de Sensibilidad

Se han presentado los resultados para tres hipótesis de crecimiento de las demandas de agua en los centros de consumo. Esto de hecho constituye un análisis de sensibilidad ante cambios en la demanda. Adicionalmente, se analizó la sensibilidad del modelo a otros dos parámetros que se consideran de especial interés; estos son: la tasa de interés utilizada en las actualizaciones y el precio del KWH, factor determinante en los costos de energía.

GRAFICO Nº 3-3 MODELO DE OPERACION REGION METROPOLITANA VALENCIA - MARACAY DEMANDA COPLANARH

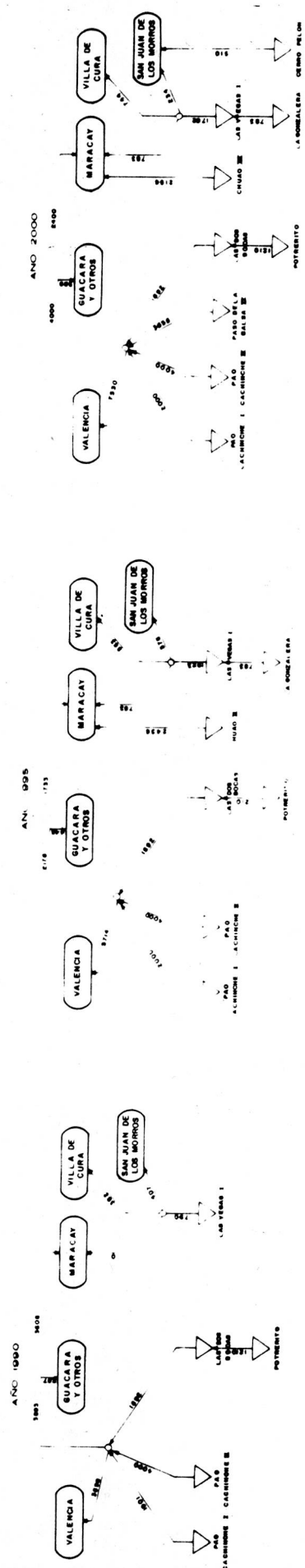
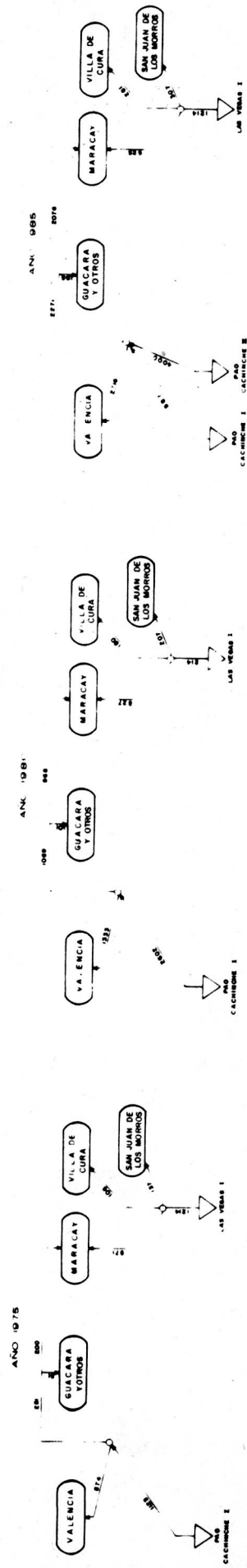


GRAFICO Nº 3-4 MODELO DE OPERACION REGION METROPOLITANA VALENCIA-MARACAY DEMANDA PROMEDIO

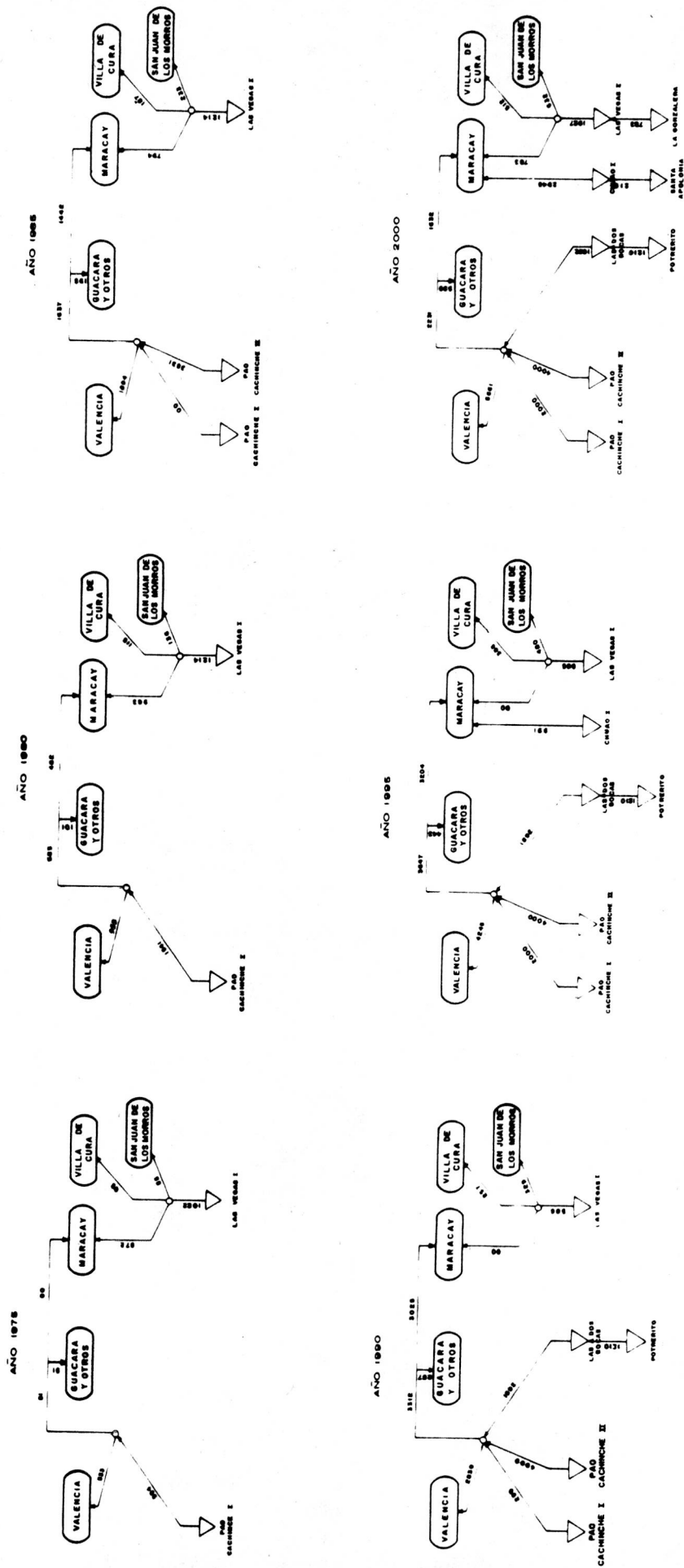
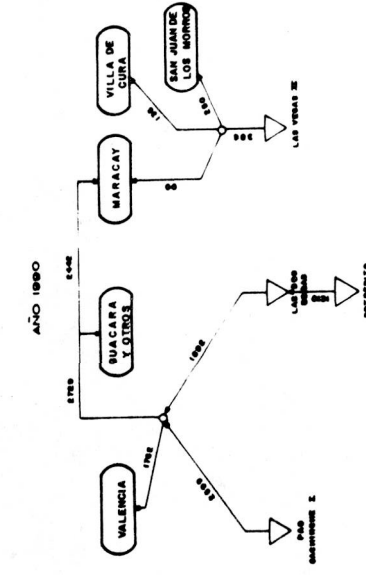
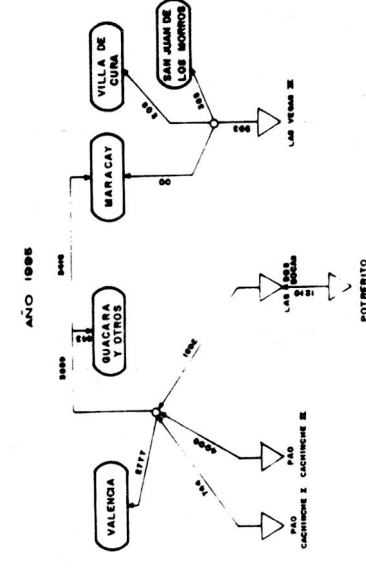
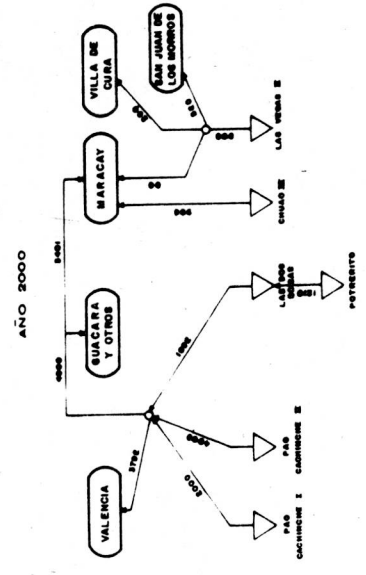
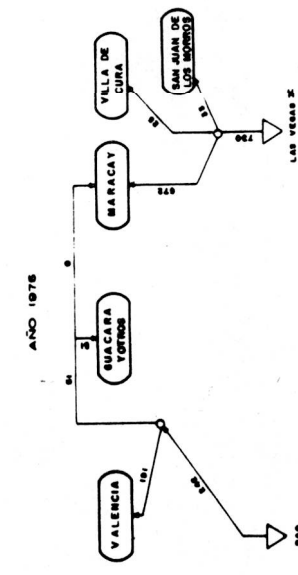
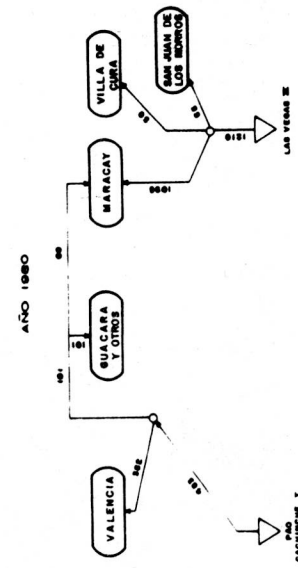
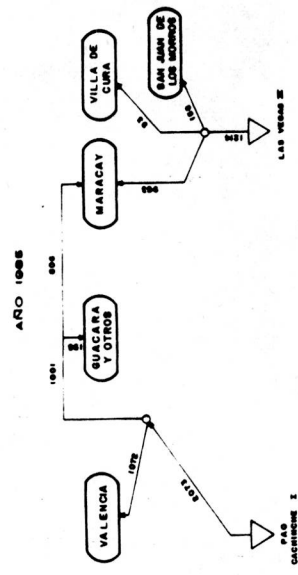


GRAFICO Nº 3-5 MODELO DE OPERACION REGION METROPOLITANA VALENCIA-MARACAY DEMANDA INDS



Así, se analizaron en total 18 casos, producto de las combinaciones siguientes :

1. Demandas :

- 1.1 COPLANARH
- 1.2 PROMEDIO
- 1.3 INOS

2. Tasa de Interés :

- 2.1 8%
- 2.2 12%

8-22%

3. Precio del KWH :

- 3.1 B^s 0.05
- 3.2 B^s 0.075
- 3.3 B^s 0.10

A continuación se presentan, en los Cuadros - N° 3.12 al 3.14, los resultados de este análisis. La sensibilidad se mide en este caso como el cambio en el valor de la función objetivo, por lo que en los resultados se reportan, para cada hipótesis de demanda, los costos actualizados del itinerario de inversiones y de los costos de energía, así como su suma, o sea, el valor total de la función, para las diferentes combinaciones de tasa de interés y precio del KWH - considerados.

Se observa en los cuadros que para una misma tasa de interés e hipótesis de demanda, los costos de inversión son constantes para diferente precio del KWH. Ello indica que la secuencia es insensible dentro de los rangos estudiados al precio de la energía. Pero no sólo la se -

CUADRO N° 3.12

ANALISIS DE SENSIBILIDAD. TASA DE INTERES Y PRECIO DE ENERGIA

Región Metropolitana Valencia-Maracay

Hipótesis de Demanda : COPLANARH

Costos Actualizados	TASA DE INTERES					
	8%			12%		
	Precio del KWH		0.10	Precio del KWH		0.10
	0.05	0.075		0.05	0.075	
Costo total (10 ⁶ B ^s)	266.56	298.72	330.89	203.35	222.26	241.16
Costos de inversión (10 ⁶ B ^s)	202.26	202.26	202.26	165.54	165.54	165.54
Costos de energía (10 ⁶ B ^s)	64.30	96.46	128.63	37.81	56.72	75.62

NOTA : Valores actualizados al 1° de enero de 1974

CUADRO N° 3.13

ANALISIS DE SENSIBILIDAD. TASA DE INTERES Y PRECIO DE ENERGIA

Región Metropolitana Valencia-Maracay

Hipótesis de Demanda : PROMEDIO

Costos Actualizados	TASA DE INTERES					
	8%			12%		
	Precio del KWH			Precio del KWH		
	0.05	0.057	0.10	0.05	0.075	0.10
Costo total (10 ⁶ B ^s)	236.01	257.60	279.20	185.38	197.81	210.24
Costos de inversión (10 ⁶ B ^s)	192.84	192.84	192.84	160.51	160.51	160.51
Costos de energía (10 ⁶ B ^s)	43.17	64.76	86.36	24.87	37.30	49.73

NOTA : Valores actualizados al 1° de enero de 1974

CUADRO N° 3.14

ANALISIS DE SENSIBILIDAD, TASA DE INTERES Y PRECIO DE ENERGIA

Región Metropolitana Valencia-Maracay

Hipótesis de Demanda : INOS

Costos Actualizados	TASA DE INTERES					
	8%			12%		
	Precio del KWH		0.10	Precio del KWH		0.10
	0.05	0.075		0.05	0.075	
Costo total (10 ⁶ B ^s)	169.13	181.71	194.30	142.29	149.32	156.35
Costos de inversión (10 ⁶ B ^s)	143.95	143.95	143.95	128.23	128.23	128.23
Costos de energía (10 ⁶ B ^s)	25.18	37.76	50.35	14.06	21.09	28.12

NOTA : Valores actualizados al 1° de enero de 1974

cuencia es insensible sino también el modelo de operación. En efecto, si se observan los costos de energía en los casos referidos, se verá que estos son una función lineal del precio del KWH, lo cual indica que el modelo de operación, para todas las fechas de control, es también insensible -otra vez dentro de los rangos considerados- a los precios de la energía, esto es, no hay cambios en el esquema de distribución de agua de orígenes a destinos.

Aún cuando la sensibilidad de la solución a cambios en la tasa de interés no se deduce del análisis de los cuadros como en los casos anteriores, los resultados señalan que, al igual que con el precio de la energía, la solución es estable, tanto en secuencia como en modelo de operación, para toda la fecha de control, ante cambios en la tasa de interés que estén dentro de los rangos considerados (1).

En los Cuadros N° 3.12 al 3.14 se puede observar la importancia de los gastos de energía en relación a los costos fijos. En efecto, en el caso de la hipótesis COPLANARH, para una tasa de interés del 8%, y un precio del KWH de 0.10 B^s, se tiene que el costo de energía equivale a un 64% de los costos de inversión. Esto revela la importancia relativa que pueden llegar a tener estos costos.

El mayor costo actualizado de la función objetivo para un itinerario óptimo corresponde a la hipótesis de

(1) No se anexan estos resultados detallados, debido a lo voluminoso de los mismos.

demanda de COPLANARH, con 8% de interés y 0.10 B^s/KWH, alcanzando la cifra de 331 millones de bolívares. Para estas mismas condiciones el valor de esta función, para la hipótesis de demanda del INOS, alcanza a 194 millones de bolívares. El valor mínimo corresponde a la hipótesis de demanda del INOS, a un precio de la energía de B^s 0,05 - por KWH, y una tasa de interés del 12%, lo que da un valor de 142 millones de bolívares.

Por último se debe mencionar que cuando se hicieron las primeras corridas del modelo, se procedió a cambiar el diseño de algunos diámetros (Tubería Pao-Cachinche II, Tubería Paso de La Balsa I, II y III y Tubería Valencia-Maracay I, II y III), así como la pendiente de algunas ecuaciones de energía, consiguiéndose con ello una reducción de los costos de inversión y energía del orden de los 22 millones de bolívares (1). Este tipo de análisis preliminar se estima muy útil para fijar las dimensiones de las alternativas. Los resultados reportados en los Cuadros N° 3.12 al 3.14 son los correspondientes a los diseños corregidos.

(1) Un ejemplo típico de una situación que obliga a reconsiderar diseños preliminares se tiene cuando en forma constante se mantiene una tubería en condiciones de subutilización a lo largo del período de análisis. A su vez un cambio de diseño influirá en la escogencia de la pendiente a ser utilizada en la ecuación de energía, por cambiar el rango relevante de valores de gasto.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A. CONCLUSIONES

1° La metodología propuesta permite conseguir eficientemente el objetivo planteado, esto es, definir aquel itinerario de inversiones y el plan de operación del sistema que minimice el costo actualizado total del suministro de agua potable a una región, en este caso la Región Metropolitana Valencia-Maracay.

La eficiencia de la metodología está medida por :

- a) Simplicidad del modelo ✓
- b) Aceptabilidad de criterios subjetivos, producto de la experiencia del planificador, y control de estos criterios. ✓
- c) Posibilidad de realizar análisis de sensibilidad post-óptimos.
- d) Reducido tiempo de computadora.

En conclusión, la metodología propuesta es una herramienta importante en la Planificación de los Recursos Hidráulicos, aún cuando en este ejemplo sólo se implementó para un solo uso. Sus resultados señalan amplias posibilidades en su aplicación a problemas de determinación de programas de obras e inversiones que se deben realizar para alcanzar las metas que demanda el desarrollo nacional.

2° Las secuencias óptimas obtenidas fueron las siguientes :

a) Demanda COPLANARH

Año	Proyecto
1975	Pao-Cachinche I Tubería Valencia-Maracay II Las Vegas I Tubería Villa de Cura-Maracay
1985	Pao-Cachinche II
1990	Las Dos Bocas Potrerito
1995	La Gonzalera Chuao II
2000	Paso de La Balsa II Cerro Pelón

b) Demanda INOS

Año	Proyecto
1975	Pao-Cachinche I Tubería Valencia-Maracay II Las Vegas Tubería Villa de Cura-Maracay
1990	Las Dos Bocas Potreritos
1995	Pao-Cachinche II
2000	Chuao III

Estas secuencias son estables a variaciones de la tasa de interés y del precio de la energía eléctrica dentro de los rangos estudiados.

B. RECOMENDACIONES

- 1° Es urgente la adopción de una legislación en cuanto al tratamiento, previo a su ingreso al Lago de Valencia, de todas las aguas negras de las poblaciones cuyos efluentes descargan en él. Aún cuando no se tome como objetivo de tales medidas el suministro de agua potable a la Región Metropolitana - Valencia-Maracay, se piensa que ellas son necesarias por razones de protección ambiental y de recreación de una comunidad que, se prevé, alcanzará los dos millones de habitantes en el año 2000. Por esta razón, se recomienda que, en el cálculo del costo asociado con el suministro de agua potable a partir del Lago de Valencia, no se le recargue el costo de tratamiento de aguas negras.
- 2° Es conveniente llevar a cabo análisis de sensibilidad con respecto a algunos costos sobre los cuales pudiera expresarse alguna duda, como también sobre la pendiente de las ecuaciones de energía.
- 3° Es recomendable proceder a análisis de sensibilidad acerca de caudales garantizados, ya que en algunos casos la información hidrológica no es muy confiable.
- 4° En el problema tal como ha sido planteado, la TUBERIA VALENCIA-MARACAY es una solución de carácter estratégico y de urgente atención a un mayor nivel de detalle. Igual atención se debe prestar a la Tubería Villa de Cura-Maracay.

5° Se recomienda seguir investigando aplicaciones de dicha metodología a sistemas de propósitos múltiples, que tengan en consideración la calidad del agua y de las obras necesarias para su tratamiento.

6° Se recomienda, una vez obtenida la secuencia óptima de obras, verificar el cumplimiento del abastecimiento de los centros de consumos, dentro de un nivel aceptable, tomando en cuenta el carácter estocástico de los escurrimientos en las fuentes consideradas. Sería deseable simultáneamente a lo anterior, definir los modelos de operación tomando en cuenta el carácter no lineal de las ecuaciones de energía.

La verificación del cumplimiento del abastecimiento a los centros de consumo permitiría reformular, en caso de ser necesario, algunas de las restricciones del modelo, predimensionamientos y sus costos correspondientes, adelantar o atrasar fechas de construcción y, en suma, contar con todo un conjunto de datos revisados con los que se pueda volver a alimentar este modelo a fin de obtener una solución óptima sobre bases más confiables.

ANEXO A
DISEÑO PRELIMINAR DE TUBERIAS

A.1 Costos unitarios de tuberías

Los costos unitarios de tuberías se obtuvieron en B^s/Kg de tubería a partir de los precios de lista del mercado, los cuales vienen dados en B^s/m.

CUADRO A-1
COSTOS DE TUBERIAS

\varnothing en mm	Costo en Fab. Sin revest. B ^s /Kg
600	2.9
660	2.4
760	2.4
920	2.4
1.070	2.4
1.220	2.1
1.520	2.1
1.830	2.1
1.980	1.9
2.140	1.9
2.290	1.9

A.2 Selección preliminar de diámetros

El procedimiento utilizado para la selección preliminar de diámetros fue el siguiente :

Supóngase una tubería de longitud L por la que deberá pasar un caudal máximo Q_{max} . El diámetro mínimo elegible \varnothing_0 se escogió a partir de una velocidad máxima permisible de 2 m/s para el Q_{max} correspondiente.

Dado este ϕ_0 se estudiaron varias alternativas, con diámetros $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$, mayores que ϕ_0 .

Para cada una de ellas se calculó :

1) la carga máxima, h_{\max} : $h_{\max} = 1.10 h_g + h_f$,

donde :

h_g = carga geométrica

1.10 = coeficiente de seguridad

h_f = carga para pérdidas por fricción ($h_f = m\phi * (Q_{\max})^2 * L$)

siendo $m\phi$ un coeficiente función del diámetro y de la calidad de la pared de la tubería (Fórmula de Strickler).

2) espesor máximo de la pared de la tubería : $e_{\max} = \frac{h_{\max} * \phi}{20 \sigma}$

donde :

e = espesor de la tubería (mm)

ϕ = diámetro de la tubería (m)

σ = fatiga de trabajo en Kg/cm^2 (se tomó $\sigma = 1.250 \text{ Kg/cm}^2$)

3) peso total de la tubería, considerando que ella estaría formada por tres tramos de igual longitud, con espesores e_{\max} , $2/3 e_{\max}$ y $1/3 e_{\max}$, respectivamente.

4) precio total de la tubería, utilizando el Cuadro A.1. A los precios unitarios reportados en la tabla se le agregó un 40% para tomar en cuenta los costos de revestimiento, transporte, excavación y colocación.

Se calcularon los costos anuales de bombeo correspondientes a cada ϕ suponiendo que la tubería considerada operaría a capacidad total, y, después de haber estimado a priori su fecha de puesta en servicio, se ac

tualizaron los costos de energía y se sumaron a la inversión inicial. Para la selección del diámetro de la tubería, se utilizó el criterio del menor valor actualizado.

Es importante señalar que la utilización tentativa de una fecha de puesta en servicio de la tubería, se hizo con el único propósito de llegar a una primera aproximación del diámetro de ésta. Dicho diseño se puede ajustar de acuerdo a los resultados del modelo.

A.3

Costos de energía

El costo total anual de energía está dado por :

$$E = \frac{9.81 * 10^{-3} * 8.760}{\eta} * Q * h * 10^3 * p \quad (\text{B}^{\$}/\text{año})$$

en donde :

1 año = 8.760 horas

p = precio de la energía en B^s/KWH

Q = caudal bombeado, supuesto uniforme durante el año (m³/seg)

h = h_f + h_g

h_f = carga para pérdidas por fricción (m)

h_g = carga para diferencias de alturas geométricas (m)

η = eficiencia del conjunto de bombeo

Se supuso η = 70% para el conjunto motor-bomba, para toda la vida útil de los equipos. Tomando η = 0.7 y expresando h en función de Q, L, m_φ y h_g, la ecuación de costos de energía es :

$$E = 0.122765 * 10^6 * p * Q (m_{\phi} * Q^2 * L + h_g) \quad (\text{B}^{\$}/\text{año})$$

y, eliminando paréntesis :

$$E = 0.123 p * Q * h_g + 0.123 p * m_{\phi} * L * Q^3 \quad (\text{millones de B}^{\$}/\text{año})$$

Se usaron valores conservadores para m_{ϕ} ya que la vida útil de las tuberías se estimó en 25 años. A continuación en el Cuadro A-2 se muestran los valores de m_{ϕ} para diferentes diámetros.

CUADRO A-2
VALORES DE m_{ϕ} PARA DIFERENTES DIÁMETROS (*)

ϕ (m)	m_{ϕ}	ϕ (m)	m_{ϕ}
0.50	73.8039	1.40	0.3044
0.60	27.9133	1.50	0.2107
0.70	12.2680	1.52	0.1984
0.76	8.5185	1.60	0.1493
0.80	6.0189	1.70	0.1081
0.90	3.2115	1.80	0.0797
0.92	2.9354	1.90	0.0597
1.00	1.8310	1.98	0.04826
1.07	1.3203	2.00	0.0454
1.10	1.1014	2.10	0.0350
1.20	0.6925	2.20	0.0273
1.22	0.6444	2.30	0.0216
1.30	0.4519	2.40	0.0172
1.37	0.3487		

(*) Considerando conducciones de hierro fundido en servicio corriente

FUENTE : Tabla N° 53, pág. 251 de Hidráulica Práctica de -
Coutinho De Lencastre y cálculos propios.

A.4

Cálculo de Costo de Estaciones de Bombeo

El costo de las estaciones de bombeo se estimó sobre la base de 500 B^s por HP instalado. Sea P la potencia total instalada (potencia necesaria + 25% de reserva) :

$$P = \frac{1.25 * 13.1}{\eta} * Q_{\max} * h, \text{ en HP}$$

tomando $\eta = 0.7$,

$$P = 23.4 * Q_{\max} * h, \text{ en HP}$$

y el costo en millones de bolívares de la tubería de bombeo será :

$$C = 23.4 * 500 * 10^{-6} * Q_{\max} * h, \text{ y finalmente,}$$

$$C = 0.0117 * Q_{\max} * h \text{ (millones de B}^s\text{)}$$

ANEXO B

LINEALIZACION DE LAS ECUACIONES DE COSTOS DE ENERGIA

En el Anexo A, párrafo A-3, se observó que el costo de energía estaba dado por una ecuación de 3^{er} grado como ésta :

$$E = aQ + bQ^3$$

El primer término corresponde a la parte de energía necesaria para salvar la altura geométrica y el 2^{do} término considera las pérdidas por fricción.

Para linealizar estas ecuaciones se graficaron las curvas para los proyectos que requieren bombeo y se trazó una recta que linealiza la ecuación de costo de energía, para el rango relevante. (Ver Gráficos B-1 a B-9)

En el Cuadro B-1, se indican los valores de los coeficientes de las ecuaciones cúbicas de Costos de Energía (columnas 1 y 2) y en la tercera columna la pendiente de la ecuación linealizada.

GRAFICO B-1

COSTO ANUAL DE ENERGIA
TRAMO PAO CACHINQUE VALENCIA (Ø 1570 mm)

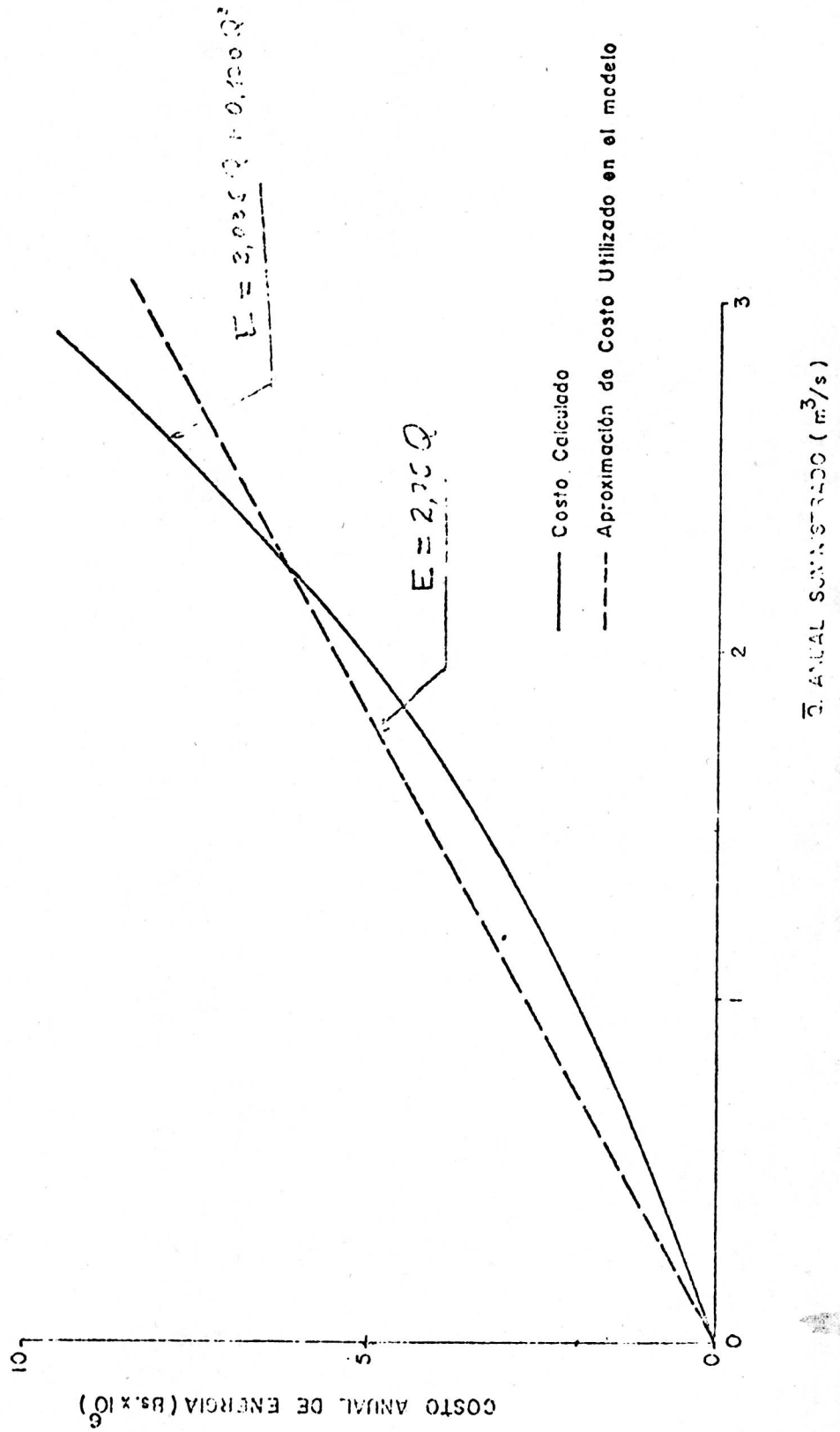
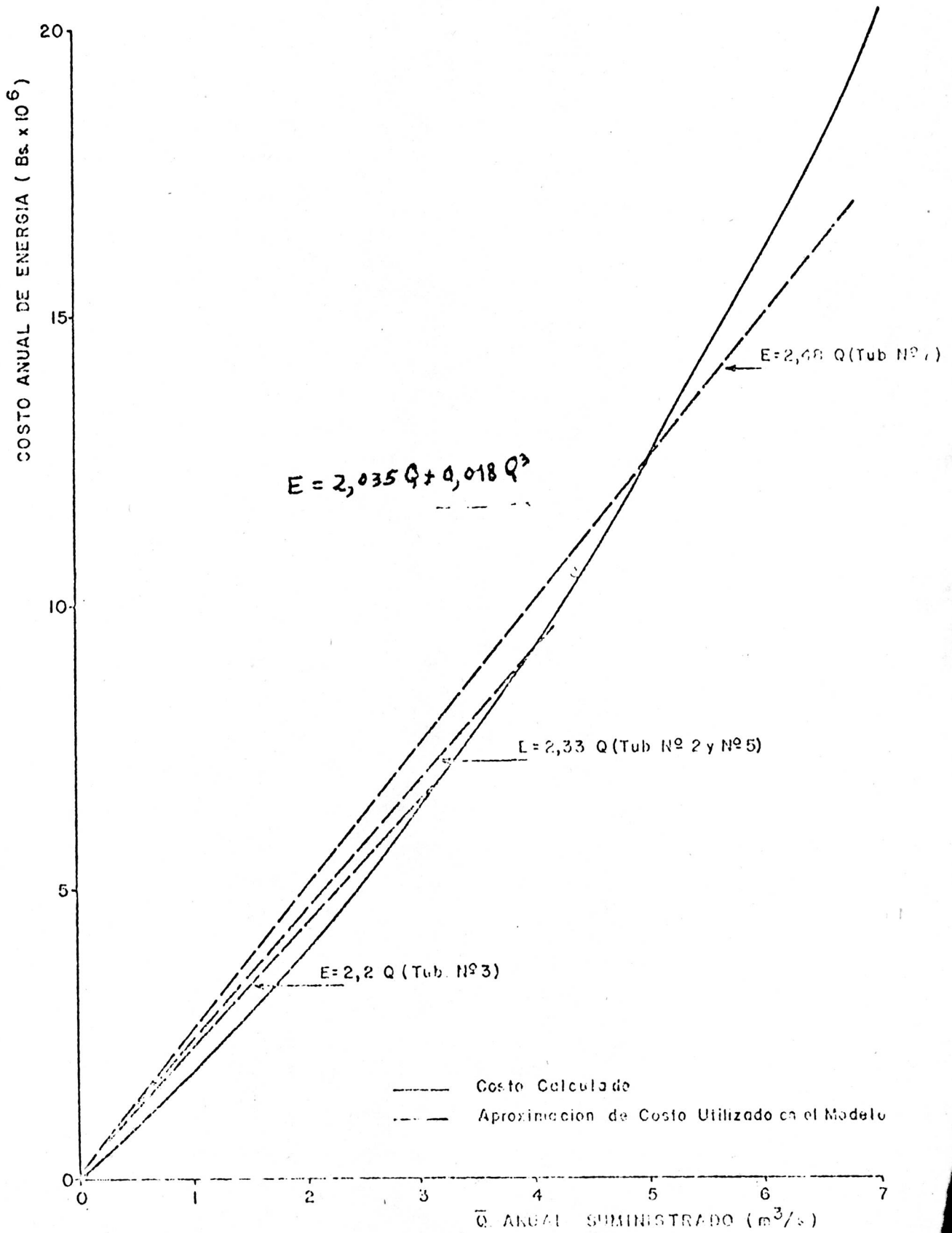
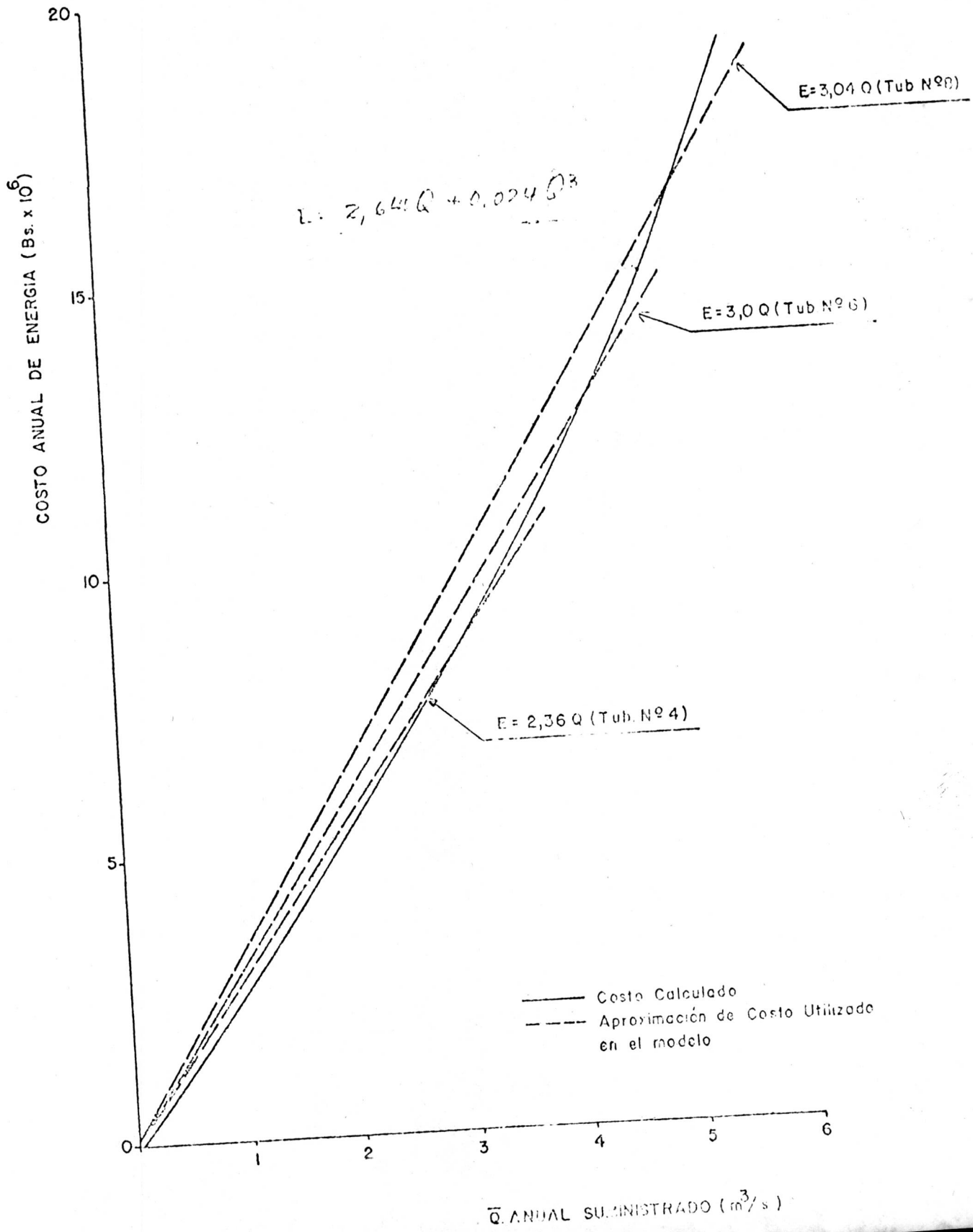


GRAFICO B-2
COSTO ANUAL DE ENERGIA
 TRAMO PAO CACHICHE-VALENCIA (Ø 1980 mm)



COSTO ANUAL DE ENERGIA
 PASO DE LA Balsa-PAO CACHINICHE (Ø1980 mm)



COSTO ANUAL DE ENERGIA
 TRAMO POTRERITO LAS DOS BOCAS (Ø 1070 mm)

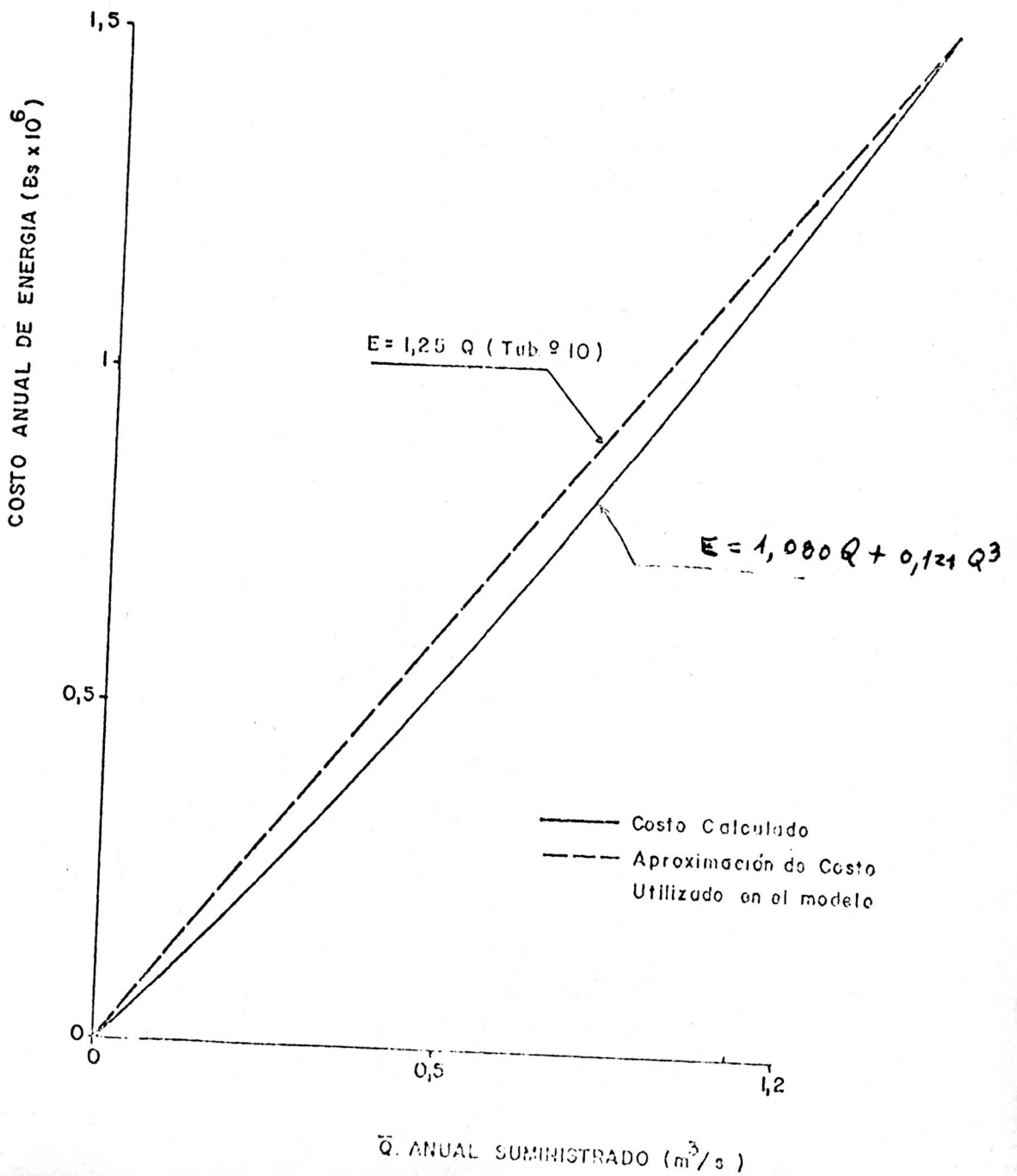


GRAFICO B-5
COSTO ANUAL DE ENERGIA
TRAMO CHUANO-MARACAY (Ø 1370 mm)

6
COSTO ANUAL DE ENERGIA (Bs x 10⁶)

20

15

10

5

0

E = 7,5 Q (Tub. N° 22)

— Costo Calculado

Q̄ ANUAL SUMINISTRADO (m³/s)

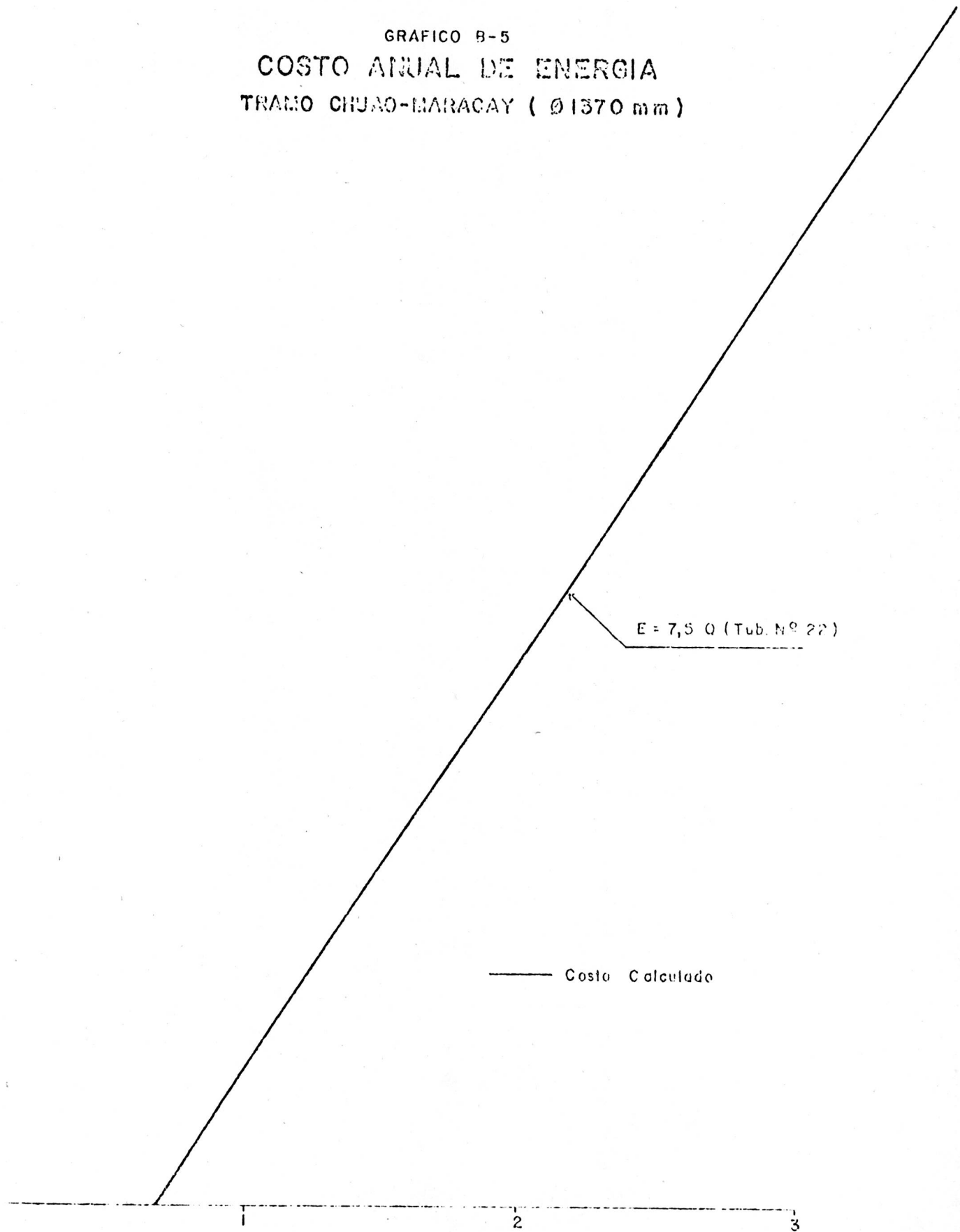


GRAFICO B-6

COSTO ANUAL DE ENERGIA

TRAMO CHUAO-MARACAY (Ø 1220 mm)

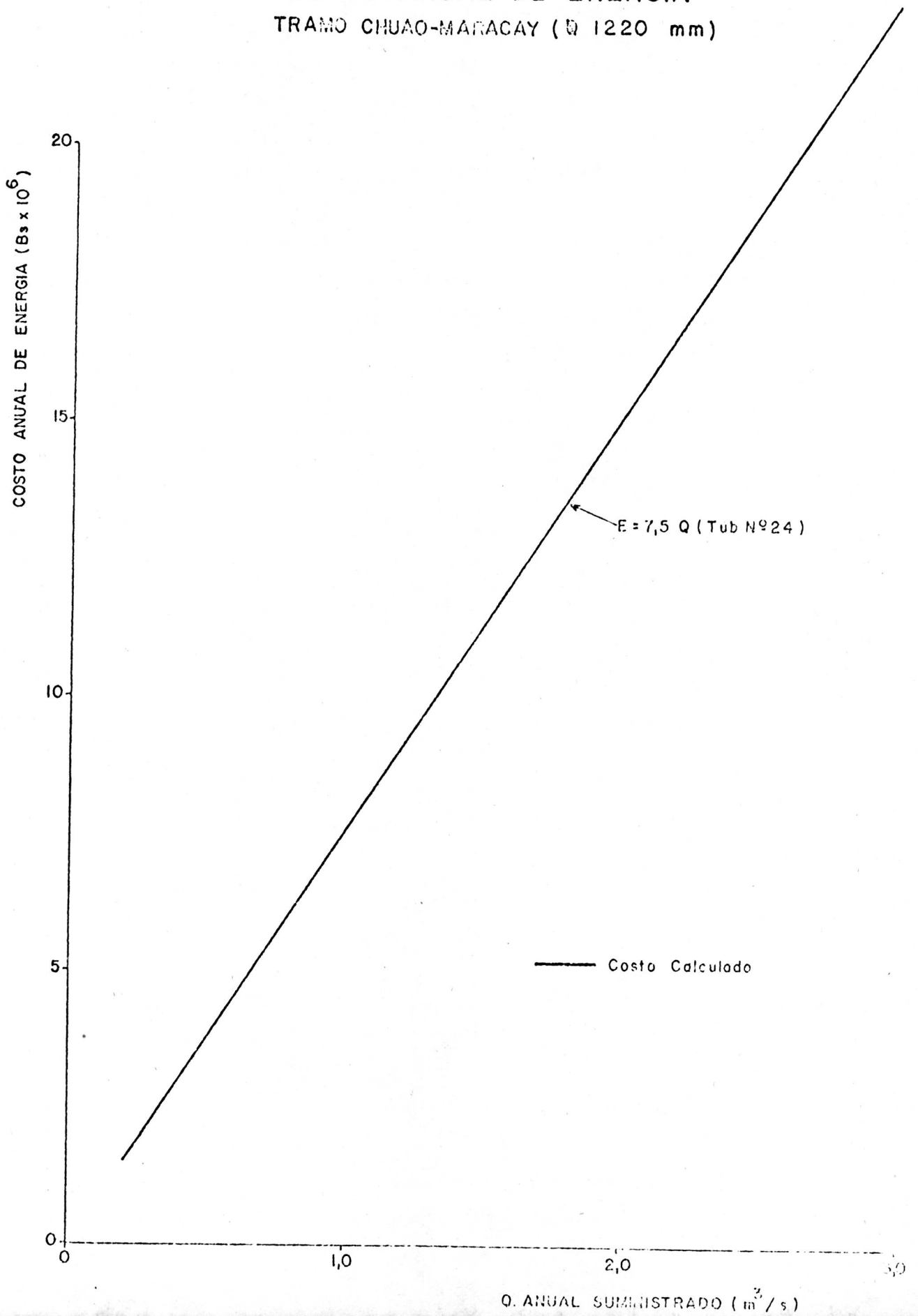
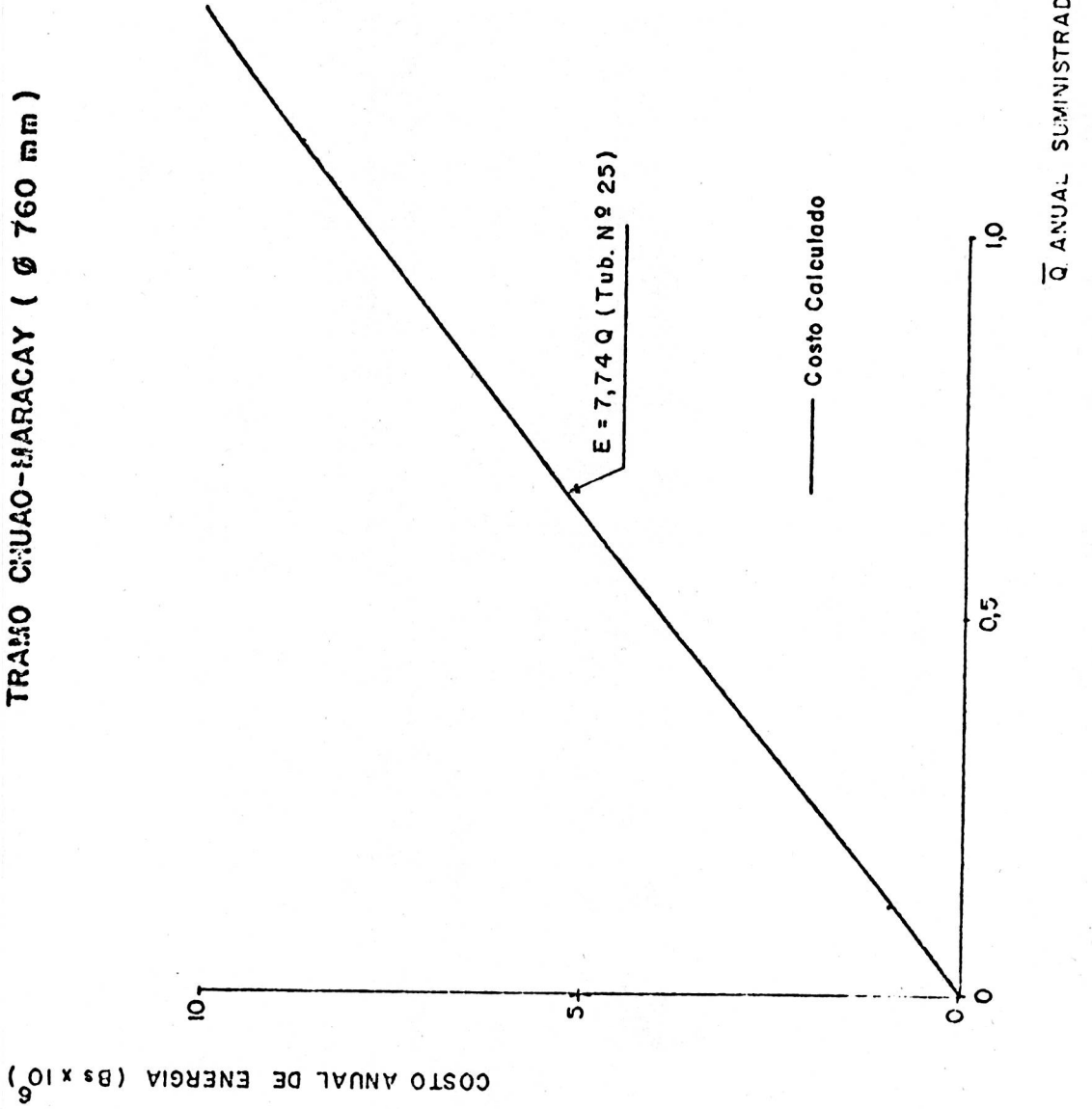


GRAFICO B-7

COSTO ANUAL DE ENERGIA
TRAMO CHUAO-HARACAY (Ø 760 mm)



COSTO ANUAL DE ENERGIA (Bs x 10⁶)

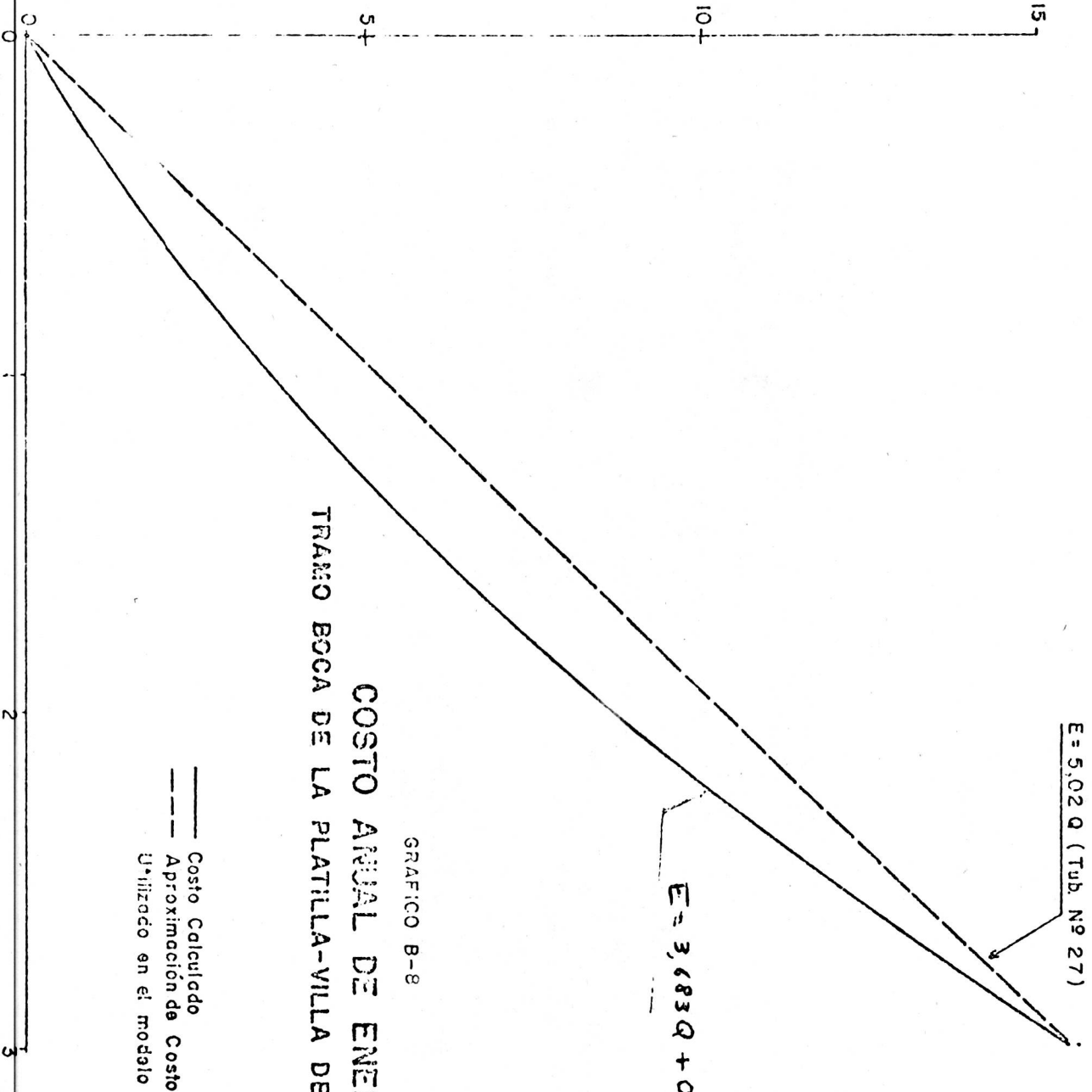
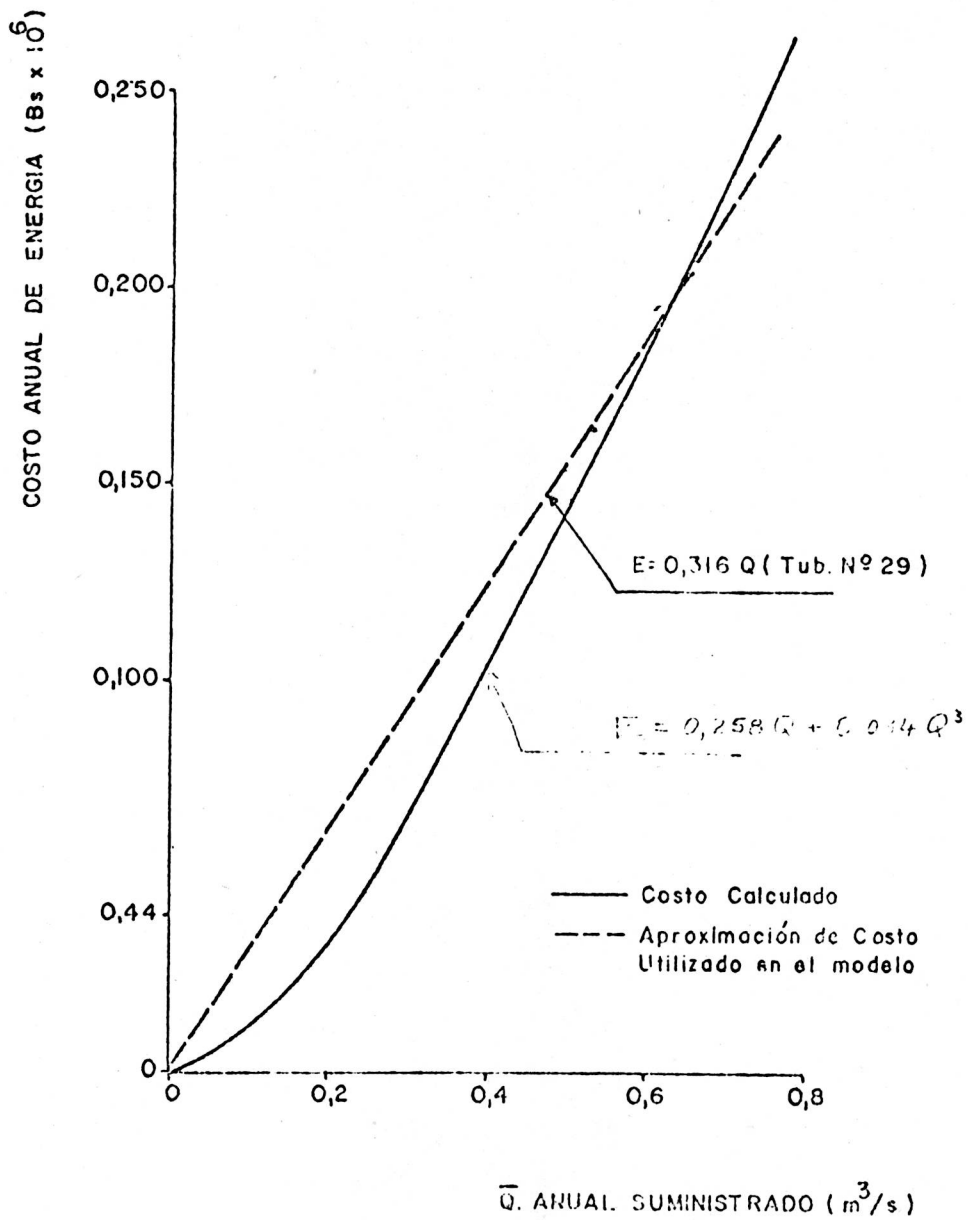


GRAFICO B-8

COSTO ANUAL DE ENERGIA
TRAMO BOCA DE LA PLATILLA-VILLA DE CURA (Ø 1520 mm)

Caudal (m³/s)

GRAFICO B-9
COSTO ANUAL DE ENERGIA
 TRAMO LA GONZALERA-LAS VEGAS (Ø 920 mm)



CUADRO B-1
COEFICIENTES DE ECUACIONES CUBICAS Y LINEALIZADAS DE
COSTOS DE ENERGIA

Tramos de Bombeo	$E = aQ + bQ^3$		$E = mQ$
	a	b	m
<u>Tramo Pao-Cachinche-Valencia</u>			
Pao-Cachinche I	2,035	0,120	2,75
Pao-Cachinche II	2,035	0,018	2,33
Paso de La Balsa I	2,035	0,018	2,20
Paso de La Balsa II	2,035	0,018	2,33
Paso de La Balsa III	2,035	0,018	2,48
<u>Tramo Paso de La Balsa-Cachinche</u>			
Paso de La Balsa I	2,640	0,024	2,36
Paso de La Balsa II	2,640	0,024	3,00
Paso de La Balsa III	2,640	0,024	3,04
<u>Tramo Potrerito-Las Dos Bocas</u>			
Potrerito	1,080	0,121	1,25
<u>Tramo Chuao-Maracay</u>			
Chuao I	7,490	0,011	7,50
Chuao II	7,490	0,020	7,50
Chuao III	7,490	0,250	7,74
<u>Tramo Boca de La Platilla-Maracay</u>			
Boca de La Platilla	3,683	0,182	5,02
<u>Tramo La Gonzalera-Las Vegas</u>			
La Gonzalera	0,258	0,013	0,32

ANEXO C

CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE ACTUALIZACION DE COSTOS

F_{ik} Y DE R_{ik}

C.1 Cálculo del Coeficiente F_{ik}

El coeficiente F_{ik} , tiene un valor diferente para cada período ($K = 1, 2, \dots, 6$), e incluye los costos de inversión inicial, mantenimiento y administración, reposición y toma en cuenta el valor residual. No considera los costos de energía, ya que estos se contemplan en el coeficiente R_{ik} .

Como se puede observar, este coeficiente está compuesto de varios elementos económicos que incluyen a su vez supuestos técnicos, siendo los más importantes la fecha de inversión, la vida útil, la reposición y el valor residual. Las vidas útiles consideradas para los cálculos fueron :

Tuberías	:	25 años
Embalses	:	50 años
Túneles	:	50 años
Carreteras	:	50 años
Estaciones de bombeo	:	15 años

El valor residual se calculó suponiendo depreciación lineal. Las inversiones iniciales se consideraron puntuales y concentradas en la mitad del período de construcción.

Para ilustrar el cálculo de un valor F_{ik} se presenta el siguiente ejemplo :

Se desea saber el valor actualizado (a una tasa de interés del 8%) - F_{ik} del flujo de costos fijos del proyecto i , el cual inicia su operación a -

fines del período 3. (1)

Sea :

E_b = Costo del embalse

T = Costo de la tubería de aducción

B = Costo de la estación de bombeo

AM = Costo anual de administración y mantenimiento

Luego se tendrá :

a) Cálculo del valor actualizado del embalse menos su valor residual :

$$E_b * \left[\frac{1}{(1.08)^{9.5}} - \frac{32.5}{50} * \frac{1}{(1.08)^{27}} \right] = 0,400 E_b$$

El primer término actualiza la inversión efectuada en la mitad del período 3, o sea, el año $9,5 = 2 + 5 + 5/2$. El segundo término actualiza el valor residual.

b) Cálculo del valor actualizado de la tubería menos su valor residual :

$$T * \left[\frac{1}{(1.08)^{9.5}} - \frac{7.5}{25} + \frac{1}{(1.08)^{27}} \right] = 0,4483 T$$

c) Cálculo del valor actualizado de la estación de bombeo menos su valor residual :

$$B * \left[\frac{1}{(1.08)^{9.5}} + \frac{1}{(1.08)^{24.5}} - \frac{12.5}{15} * \frac{1}{(1.08)^{27}} \right] = 0.5287 B$$

En este caso el segundo término corresponde a la reposición de los equipos de bombeo.

(1) Cabe hacer notar que el período 1 consta de 2 años (1974-1975) y el resto de los períodos, 5 años; o sea, el período 3 va de 1980 a 1985. La actualización se hace al 1° de enero de 1974.

- d) Cálculo del valor actualizado de los costos de administración y mantenimiento (no incluye energía) :

$$AM^* \left[\frac{2.5}{(1.08)^{10.75}} + \frac{5}{(1.08)^{14.5}} + \frac{5}{(1.08)^{19.5}} + \frac{5}{(1.08)^{24.5}} \right] = 4.6045 \text{ AM}$$

El numerador del primer término considera 2.5 años del período 3. El intervalo de actualización se midió hasta la mitad de los intervalos de la serie de gastos uniformes.

Luego F_{ik} , para $k = 3$, será

$$F_{ik} = 0.400 E_b + 0.4438 T + 0.5287 B + 4.6045 \text{ AM}$$

El Cuadro C-1 indica los valores de F_{ik} para todos los proyectos y fecha de control.

C.2 Cálculo del coeficiente R_{ik}

Para los efectos de homogeneización, los consumos anuales de energía de bombeo se supusieron iguales al promedio del consumo de principio y de fin de período; se sumaron los costos correspondientes, y su suma se consideró concentrada en la mitad de cada período.

Se utilizó la función linealizada de los costos de energía (Véase Anexo B).

Entonces se tiene :

$$CE_{i,k} = \frac{Q_{ik} + Q_{i,k-1}}{2} * m_i * n_k * f_k$$

en donde :

$CE_{i,k}$ = Costo de energía del proyecto i consumida en el período k

Q_{ik} = Caudal bombeado a fin de período

$Q_{i,k-1}$ = Caudal bombeado a principio de período

m_i = pendiente de la línea de costos de energía del proyecto i
 n_k = N° de años del período k
 f_k = factor de actualización correspondiente al período k
 y, definiendo R_{ik} de la siguiente manera :

$$R_{ik} = \frac{1}{2} * m_i * n_k * \frac{1}{(1+i)^t}$$

siendo t el centro del intervalo del período k referido al 1° de enero de 1974.

se tiene

$$CE_{ik} = (Q_{ik} + Q_{i,k-1}) * R_{ik}$$

por ejemplo :

$$CE_{i6} = (Q_{i5} + Q_{i6}) * R_{i6}$$

o

$$CE_{ik} = \frac{Q_{i5} + Q_{i6}}{2} * m_i * 5 * \frac{1}{(1.08)^{24.5}}$$

En el Cuadro N° C-2 se muestran los valores de R_{ik} utilizados en el modelo.

CUADRO C-1

VALORES DE F_{ik}

Tasa de Interés 8%

Proyecto	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6
Pao-Cachinche I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pao-Cachinche II	75,47	54,54	35,03	21,56	10,53	3,03
Paso de La Balsa I	178,66	129,24	83,07	51,12	24,93	7,17
Paso de La Balsa II	193,34	139,94	89,82	55,19	26,98	7,77
Paso de La Balsa III	238,69	172,58	110,34	67,64	33,16	9,24
Las Dos Bocas	24,65	17,87	11,52	7,08	3,45	0,99
Potrerito	12,62	9,08	5,80	3,57	1,71	0,480
Tubería Valencia-Maracay I	93,52	67,12	43,78	27,02	13,18	3,78
Tubería Valencia-Maracay II	71,33	51,78	33,42	20,54	10,08	2,89
Tubería Valencia-Maracay III	63,04	45,66	29,51	18,21	8,89	2,55
Tubería Valencia-Mariara	17,95	130,6	8,42	5,14	2,54	0,73
Chuafo I	146,99	106,29	67,26	40,71	19,64	5,56
Chuafo II	144,78	104,77	66,24	40,03	19,34	5,48
Chuafo III	105,49	76,08	48,36	29,33	14,04	3,99
Santa Apolonia	57,30	41,46	26,26	15,89	7,63	2,15
Boca de La Platilla	236,75	171,24	110,27	67,93	33,14	9,51
Las Vegas I	33,76	24,47	15,68	9,57	4,64	1,31
Las Vegas II	31,13	25,52	14,43	8,83	4,26	1,21
La Gonzalera	35,18	25,49	16,71	9,77	4,72	1,33
Tubería Villa de Cura-Maracay	18,95	13,72	8,87	5,47	2,67	0,77
Cerro Pelón	18,77	13,57	8,65	5,26	2,51	0,71

CUADRO C-2

VALORES DE R_{ik}

Tasa de Interés 8%

Proyecto	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6
Pao-Cachinche I	7,409	8,172	5,561	3,785	2,576	1,043
Pao-Cachinche II	6,277	6,924	4,712	3,207	2,183	0,884
Paso de La Balsa I	13,632	15,036	10,233	6,964	4,740	1,920
Paso de La Balsa II	14,342	15,830	10,770	7,360	5,010	2,030
Paso de La Balsa III	14,871	16,403	11,164	7,598	5,171	2,094
Potrerito	3,367	3,714	2,528	1,721	1,171	0,474
Chuaco I	20,206	22,288	15,169	10,324	7,026	2,845
Chuaco II	20,206	22,288	15,169	10,324	7,026	2,845
Chuaco III	20,852	23,000	15,653	10,653	7,250	2,936
Boca de La Platilla	13,500	14,900	10,140	6,930	4,710	1,910
La Gonzalera	0,861	0,952	0,649	0,441	0,302	0,123
Santa Apolonia	20,206	22,288	15,169	10,324	7,026	2,845

