

COMISION ECONOMICA PARA AMERICA LATINA  
COMITE DE COOPERACION ECONOMICA  
DEL ISTMO CENTROAMERICANO  
SUBCOMITE CENTROAMERICANO DE  
ELECTRIFICACION Y RECURSOS HIDRAULICOS  
Grupo Regional de Interconexión Eléctrica (GRIE)

LIMITADO  
CCE/SC.5/GRIE/IV/DI.3  
Febrero de 1977

ORIGINAL: ESPAÑOL

Cuarta reunión  
Panamá, República de Panamá, 24 al 26 de febrero de 1977

MODELO DE OPERACION SIMULADA DE UNA CENTRAL  
HIDROELECTRICA (OPERHID)

Este informe es una reproducción del manual de uso del modelo de operación simulada de una central hidroeléctrica que utiliza la Empresa Nacional de Electricidad, S.A. (ENDESA) de Chile para la evaluación de proyectos hidroeléctricos y en la preparación de antecedentes para el Modelo Global de Selección de Inversiones.

PROGRAMA DE OPERACION SIMULADA  
DE CENTRALES HIDROELECTRICAS

Este programa ha sido desarrollado por la Oficina de Evaluación de Proyectos Hidroeléctricos a partir de un programa similar empleado por la empresa canadiense INTERNATIONAL POWER AND ENGINEERING CONSULTANTS LTD. (IPEC) en sus cálculos de generación de energía eléctrica. La programación en lenguaje FORTRAN IV, el diseño de los formularios para datos y en general la adaptación del programa para ser procesado en el computador IBM-360, <sup>estaba</sup> ha estado a cargo de la División Estudios Especiales y Tecnológicos del Departamento de Organización y Procesamiento de Datos.

El programa en referencia, que se ha denominado ØEPH 03, permite realizar estudios de operación de embalses, de potencia y energía de centrales hidroeléctricas en el supuesto de que se prescinde de las limitaciones impuestas por sistemas de transmisión o de distribución. También permite efectuar estudios de bombeo, siempre que el embalse alimentador se utilice como estanque elevado, y estudios de filtración en aquellos casos en que se conoce la ley que relaciona el caudal filtrante con el nivel de aguas del embalse.

El estudio de generación se efectúa conforme a una regla de operación del embalse que se da como dato, y respetando las siguientes restricciones:

- a) Descarga de los caudales mínimos demandados aguas abajo de la central (riego, agua potable, alcantarillado).
- b) Descarga de los caudales necesarios para generar una cierta energía firme exigida a la central. Esta energía firme es un dato que se da en cada procesamiento y tiene una distribución en el tiempo tal que se ajusta a las variaciones temporales del déficit de energía del sistema abastecido.

Las restricciones (a) y (b) predominan sobre la regla de operación del embalse, por lo que los volúmenes evacuados igualarán a los correspondientes a la restricción de mayor magnitud toda vez que la regla proporcione volúmenes menores.

Esta regla de operación se puede suministrar de dos maneras:

- a) Se supone una norma fija para el período de un año, es decir, la variación estacional de la operación del embalse será la misma para todos los años de la estadística.
- b) Se trabaja con una "Malla de Alerta", es decir, un conjunto de decisiones que dependen tanto del mes como del estado del embalse. Esta malla de alerta se obtiene del programa de igual nombre de esta Oficina (Ø EPH05 -E), que calcula el conjunto de decisiones utilizando métodos de optimización aplicables mediante programación dinámica.

Para el cálculo de las alturas netas de caída es necesario suministrar al computador los datos correspondientes a la curva de volúmenes embalsados en función de la altura, y la de cotas de descarga en función del caudal total evacuado. Ambas deberán expresarse en el mismo sistemas de cotas, o sea deberán usar un mismo nivel de referencia. Cada una de estas curvas se especifica mediante una lista de a lo más 50 puntos, ordenados de menor a mayor.

Aunque los datos se introducen siguiendo el orden del año calendario (salvo el caudal afluente), los cómputos se realizan conforme al año hidrológico, para lo cual es necesario precisar en qué mes se inicia este año.

Como unidad de tiempo se usa el mes. A pesar de ello es posible tomar unidades de tiempo diferentes, siempre que la siguiente unidad mayor esté compuesta de 12 unidades elementales de tiempo. Por ejemplo, es posible realizar operaciones horarias considerando períodos de 2 horas; en esta forma se cumple que el día (unidad mayor) contendrá 12 unidades de 2 horas.

El número máximo de años (o bien de unidades mayores) que acepta el programa es de 50 años. Cada pasada de la estadística disponible a través del computador constituye un ciclo, que puede ser repetido cuantas veces se desee con distintos datos de entrada. Se logra visualizar en esta forma cómo se comporta la central que se investiga con distintas características de regulación y de capacidad instalada, distintas reglas de operación del embalse o exigencias de potencia

y de energía del sistema abastecido. Además, en aquellos casos en que se trate de centrales de bombeo es posible introducir variaciones en las características de los equipos de bombeo o en la regla de bombeo.

Para realizar los estudios de centrales de bombeo es necesario suministrar al computador las características de las bombas, el tiempo máximo de bombeo de cada mes, expresado como porcentaje del tiempo total del mes, y los niveles que se pretende alcanzar en el embalse con los volúmenes elevados.

Cuando parte del caudal afluente al embalse se pierde por filtraciones, es posible considerar los efectos de estas pérdidas sobre la generación de la central introduciendo la ley que rige los caudales filtrantes en función del nivel de aguas en el embalse. También se obtendrá en este caso información sobre los caudales medios mensuales y medios anuales perdidos por filtración.

Como resultados de la operación simulada, el programa suministra los siguientes valores: valores mensuales del volumen inicial embalsado, cota final del mes del embalse, caudal afluente, caudal efluente del embalse, caudal máximo que puede descargar la central, caudal de rebase, cota media mensual alcanzada en el embalse y en la descarga, altura neta de caída, energía generable, energía perdida por rebase, energía consumida en bombeo o caudal de las filtraciones según si se incluye bombeo o estudio de filtraciones y potencia de punta mínima que se puede dar durante el mes. Se dan además los valores anuales de la generación de invierno y del año y los valores medios anuales de los caudales rebasados, de los filtrantes (cuando los hay), y de los efluentes.

Finalmente se publica un resumen con los datos característicos de cada operación. Estos son: cota mínima que alcanza el embalse en los años considerados en la operación, cota media del embalse, cota media de descarga, altura neta media de caída, altura media ponderada con la energía, caudal medio anual de filtración (si procede), caudal de rebase medio anual, caudal de generación medio anual, energía media anual perdida por rebase, la energía media anual, la firme (distribuida mensualmente conforme a las necesidades del consumo), y las energías de invierno y de verano; por último se indica la energía media mensual requerida para cumplir con el programa de bombeo (cuando lo hay). Esta información se completa mediante un cuadro en

que se muestran los niveles mínimos que alcanza el embalse en el caso más desfavorable de cada uno de los meses del año, las potencias mínimas de punta (plena abertura de las turbinas) y las energías asociadas al nivel mínimo. Para apreciar la seguridad con que se pueden entregar estas potencias mínimas se las ha relacionado con las correspondientes generaciones, con lo cual ha sido posible obtener el número de horas diarias que la central podría operar de punta en estas condiciones mínimas. En una última columna se han individualizado los años en que se producen estos valores mínimos.

Cuando no se requiere información mensual de la operación, es posible emplear otro formato en que sólo se publica la información correspondiente a cada año de estadística que se posee, quedando el cuadro resumen sin variaciones con respecto al caso que da la información mensual completa.

Los datos para realizar cada operación se entregan perforados en tarjetas, que llevan la denominación e información que se indica a continuación :

TARJETA	INFORMACION
Datos Generales	
	A Identificación de la operación
	B Datos básicos
	C Caudales mínimos mensuales por <u>en</u> tregar (m <sup>3</sup> /s)
	D Indicador de impresión de gastos afluentes
Gastos Afluentes	
	E Estadística de gastos afluentes (m <sup>3</sup> /s)
Curvas de Embalse y de Descarga	
	{ F Niveles del embalse (m)
	{ G Volúmenes correspondientes (mill m <sup>3</sup> )
	H Niveles de descarga (m)
	I Caudales de descarga (m <sup>3</sup> /s)
Bombeo (si lo hay)	
	J Tiempo máximo de bombeo admisible: <u>Tbombeo al mes</u> Tmes

TARJETA

INFORMACION

Filtraciones (siempre que proceda)

JJ Niveles del embalse  
JJJ Caudales de filtración (m<sup>3</sup>/s)

Indicador de Malla de Alerta (si <sup>siempre</sup> procede)

Malla de Alerta (si procede)

Valores propios de cada ciclo

K Características de la central  
L Demanda mensual de energía firme (GWh)  
(si procede) M Regla de operación del embalse  
(sólo si hay bombeo) N Valores propios del bombeo  
(sólo si hay bombeo) O Regla del bombeo (volumen acumulado que debe poseer el embalse al final de cada mes)

En caso de no existir la malla de alerta el juego de tarjetas K, L, M, N, O, (o K, L, M, cuando no hay bombeo), deberá repetirse tantas veces como número de ciclos se haya especificado en la tarjeta B. Si se dispone de malla de alerta, se elimina la tarjeta M y todos los ciclos definidos por las tarjetas K, L, N, O (K, L, cuando no hay bombeo), se ejecutan con la operación que dicta la malla.

Si se dispone de la malla de alerta, debe incluirse una tarjeta con el indicador de malla (número uno) y el número de tramos en que se ha subdividido el embalse; a continuación vendrán las tarjetas de la malla, las cuales son perforadas por el programa ØEPH05, y finalmente la información de cada ciclo.

Si se procesa una curva de alerta fija, la tarjeta del indicador debe estar en blanco, y se omite la malla de alerta; en este caso, la información de cada ciclo debe incluir la tarjeta M.

Para la perforación de las tarjetas anteriores se usan los formularios que se incluyen al final del anexo 1. Como indicadores, ya sea de impresión mensual, de bombeo, de filtraciones o de impresión de la estadística, se usan los números 0 y 1. Se usa el uno para incluir la variable identificada por el indicador. El cero es para su exclusión.

Así, al usar cero para el indicador de impresión mensual se obtendrá el formato reducido, con impresión anual solamente. Análogamente, poniendo ceros en alguno de los otros tres indicadores no se considerarán estudios de bombeo o de filtraciones, etc. respectivamente. Si se excluye el bombeo, deberán eliminarse las tarjetas J, N y O. Si no se desea considerar filtraciones (o bien evaporación del embalse) se deberán excluir las tarjetas JJ y JJJ de la información entregada al computador.

Una estimación del tiempo que el computador tarda en realizar la operación simulada correspondiente a un ciclo se puede obtener considerando un promedio de 2,8 seg por año procesado cuando la operación incluye varios ciclos y unos 3,6 seg por año cuando se procesa uno a dos ciclos.

En el Anexo 1 se ha incluido una descripción detallada de la información que debe ser suministrada al computador y de la forma en que debe ser presentada para la correcta perforación de las tarjetas.

En el Anexo 2 se describe más detalladamente el proceso de simulación que se realiza mediante el computador. También se adjunta aquí el diagrama de flujo del programa.

En el Anexo 3 se publica la lista de los estudios que normalmente se realizan con el programa. Los diversos términos usados en la programación en FORTRAN se han definido en el Anexo 4. Finalmente se incluyen en el Anexo 5 las características del programa desde el punto de vista de su uso en el computador IBM-370.

ANEXOS

- Anexo 1 : Descripción detallada de la información que debe ser suministrada al computador; formularios de datos.
- Anexo 2 : Proceso de simulación empleado; Figura 1. Diagrama de flujo del programa.
- Anexo 3 : Lista de los estudios más importantes que pueden realizarse mediante el programa.
- Anexo 4 : Términos usados en el programa escrito en FORTRAN IV.
- Anexo 5 : Características del programa desde el punto de vista de su uso en el computador IBM - 370;

## DATOS NECESARIOS PARA LA OPERACION DEL PROGRAMA

### Forma de Ubicar los Datos

Los datos pueden ser números enteros o números reales (con decimales). En el primer caso, los enteros deberán alinearse a la derecha en su "campo" (espacios reservados para el dato). En el caso de los números reales, los decimales se separarán de los enteros por un punto decimal que ocupará un espacio, no importando la ubicación del dato dentro de su campo.

### Datos Requeridos

Para realizar la operación simulada de una central mediante el programa ØEPH03 se necesita la información siguiente y en el orden indicado :

#### A. Identificación de la Operación :

Se deberá señalar si la prueba es preliminar o definitiva, el nombre de la central, la fluctuación máxima elegida para el embalse, el nombre del operador y la fecha en que se realiza esta operación simulada.

#### B. Datos Básicos :

Se deberá indicar el número de ciclos que se desea y la fecha en que se iniciará la operación (mes y año). El mes se identificará con su número de orden (Enero: 01, Diciembre: 12); el año en cambio deberá anotarse con sus cuatro cifras. Además, se deberá indicar el número de años enteros que comprende la operación.

Es posible elegir dos formatos para la entrega de datos:

- a) Impresión de los valores mensuales : en este caso se imprimen todos los valores correspondientes a cada mes de operación simulada. Para usar este formato es necesario anotar un uno (1) en la columna 11 de esta tarjeta.

- b) Impresión de los valores anuales : se imprimen sólo los valores anuales de la generación total y de invierno, del caudal afluente y el valor medio anual de los rebases y de los caudales de filtración (siempre que existan) o de las energías de bombeo. Este tipo de impresión se logra anotando un cero (0) en la columna 11.

Si la operación simulada considera bombeo será necesario poner un uno (1) en la columna 12 de la tarjeta en referencia. Colocando un 0 en este lugar se elimina el estudio de bombeo, y en este último caso se deberá prescindir del uso de las tarjetas N, Ø y J, que son las que poseen la información del bombeo.

En forma análoga se procede para introducir el estudio de filtraciones en la simulación. Si el embalse pierde parte del afluente por filtración (o evaporación) y se conoce la relación entre estas pérdidas y el nivel del embalse, podrá considerárseles poniendo un uno (1) en la columna 13 de la tarjeta y poniendo los niveles del embalse en la tarjeta JJ y los caudales de filtración correspondientes en la tarjeta JJJ. En caso de no desear introducir filtraciones (o evaporaciones) en el estudio bastará con poner un cero (0) en la columna 13 y eliminar las tarjetas JJ y JJJ.

La eficiencia de la central está dada por la eficiencia conjunta de la turbina, el generador y el transformador de poder, para dar la energía en alta tensión; con el fin de simplificar el proceso de simulación, se ha supuesto en el programa que la eficiencia de la transformación de la energía hidráulica en eléctrica es constante, independiente del nivel del embalse y de las fluctuaciones diarias de carga. Por esta razón el valor que se indique deberá corresponder a un promedio ponderado que considere la variación de los factores mencionados. Se deberá proceder en forma similar al anotar la eficiencia de los grupos bombas. En la columna 20 y 25 se ha anotado el punto, de modo que en los casilleros libres sólo deben ponerse las cifras significativas después de la coma.

C. Caudales Mínimos por Entregar cada mes ( $m^3/s$ ) :

Estos gastos corresponden a los medios mensuales que la central debe entregar para satisfacer las demandas de aguas abajo de este lugar (riego, agua potable, alcantarillado, industrias, etc.). Deben

anotarse partiendo con el valor de enero y finalizando con el de diciembre.

D. Impresión de la estadística de caudales afluentes al embalse :

Si se desea obtener esta información, que incluye los promedios anuales, mensuales y el total, deberá perforarse un 1 en la columna 1. En caso contrario deberá anotarse un cero (0), o incluir una tarjeta en blanco.

E. Estadística de Gastos Afluentes ( $m^3/s$ ) :

En esta tarjeta se anotan los valores estadísticos de los caudales medios mensuales afluentes al embalse en el orden en que se desea se efectue la operación. Así, si se desea obtener resultados correspondientes a años calendarios el mes inicial deberá ser enero. Si se prefiere realizar la operación según años hidrológicos se tomará como mes inicial abril o mayo, según sea el caso.

Para identificar los datos anotados en cada tarjeta se anota el año a partir de la columna 73 en adelante. Esta anotación solo servirá al usuario del programa, ya que no será leído por el computador.

F y G. Curva  $V = f(H)$  del embalse :

En las tarjetas F se anotan las cotas o alturas de agua en el embalse, en tanto que en las tarjetas G se indican los respectivos valores de los volúmenes. La curva podrá identificarse con un máximo de 50 puntos.

H e I. Curva  $H = f(Q)$  de la Descarga de la central :

Los niveles de descarga se pondrán en las tarjetas H, y los caudales de descarga correspondientes se anotarán en las tarjetas I. Deberá usarse para las cotas el mismo nivel de referencia que en el caso anterior. Tal como antes, esta curva podrá individualizarse por un máximo de 50 puntos.

J. Tiempo máximo admisible de bombeo :

Esta tarjeta se incluirá sólo cuando se desee realizar estudios con bombeo, o sea siempre que el indicador de bombeo valga uno (1). El tiempo máximo de bombeo se podrá estimar determinando el tiempo durante el cual es posible utilizar la energía térmica sobrante del sistema y el período de tiempo en que es posible detener los generadores para usarlos como motor en el caso de grupos reversibles. El tiempo de bombeo deberá expresarse como fracción (0/1) del tiempo total del mes para introducirlo al programa.

JJ y JJJ. Curva Qfiltración = f (H) del embalse :

Los niveles de agua en el embalse se anotarán en las tarjetas JJ, mientras que los caudales filtrantes correspondientes a esos niveles se anotarán en las tarjetas JJJ. El número máximo de puntos que podrán ponerse para identificar la curva es de 50.

Indicador de Malla de Alerta :

En esta tarjeta se incluye, además del indicador que señala si existe o no la malla, el número de niveles en que se ha subdividido la fluctuación total del embalse (que es igual al número de tarjetas que conforman la malla de alerta). Si no se dispone de la malla, se dejará esta tarjeta en blanco.

- Malla de Alerta :

Se entregan todas las decisiones mensuales correspondientes a un estado o nivel en una tarjeta. Por lo tanto, habrá tantas tarjetas como niveles.

Estas tarjetas se obtienen del proceso del programa de Malla de Alerta (JØB ØEPH05), el cual es complementario con este programa de Operaciones Simuladas.

La regla de operación adoptada de acuerdo a esta malla variará con el estado del embalse y con el mes; por lo tanto, no se repetirá la misma decisión para el mismo mes, y la curva de alerta no será entonces la misma para todos los años, sino que mostrará una variación interanual, que podrá obtenerse de la hoja de resultados del programa.

El programa parte extrayendo del embalse el volumen necesario para cumplir con la decisión de operación. Posteriormente este volumen se compara con el requerido por las condiciones de caudal mínimo por entregar aguas abajo de la central y con el determinado por las necesidades de energía firme. En caso que alguno de estos dos volúmenes sea mayor que el dado por la decisión de operación, el programa adoptará como definitivo el volumen por extraer de mayor magnitud. Por otro lado, si el volumen determinado por esta decisión es mayor que el que la central puede descargar a través de las turbinas, no se respetará la decisión y se dejará en el embalse aquella parte del volumen que no se pueda aprovechar en generación

Valores propios de cada ciclo :

Estos se pondrán en las tarjetas K, L, M, N y O si hay bombeo, K, L, M si no hay ó K, L si hay malla de alerta. Los datos contenidos en ellas podrán variarse tras la ejecución de cada ciclo. Deberán ponerse tantos conjuntos de tarjetas K-L-M-N-O, K-L-M ó K-L, como el número de ciclos que se haya decidido procesar.

K. Condiciones del embalse y características de los grupos generadores:

1. Volumen embalsado : <sup>mm<sup>3</sup></sup> a) Mínimo: es el volumen que queda en el embalse después que se ha extraído el total del volumen útil de regulación. b) Máximo: corresponde a la capacidad máxima del embalse, o sea al volumen que existe en el embalse en el momento en que el nivel llega al nivel máximo admisible.
2. Cota inicial del embalse : es el nivel de aguas existentes a principios del mes y año elegidos como valores de partida de la operación. (m)
3. Pérdida de carga máxima: <sup>(mm)</sup> se anota la que se produce entre la bocatoma y la descarga de la central cuando ésta se encuentra operando con caudal máximo. La pérdida de carga efectiva es calculada mes a mes en forma interna por el programa, en función del caudal mensualmente generado y suponiendo que la central funciona a plena carga durante un 20% del tiempo (4.8 horas al día).

<sup>m<sup>3</sup>/s</sup>

4. Caudal máximo admisible : éste es el que utiliza la central cuando sus grupos se encuentran operando a plena carga y con una altura neta igual a la mínima que permite operar los generadores a toda su potencia.
5. Potencia : es la suma de las potencias máximas de las máquinas con que cuenta la central, expresadas en MW y medida en bornes de alta tensión.
6. Altura de caída : (HPMAX) se refiere a aquella altura a partir de la cual las turbinas operando a plena abertura producen una potencia igual o superior a la capacidad máxima de los generadores.

L. Demanda mensual de energía firme :

Estos valores corresponden a las energías mínimas mensuales que puede entregar la central para satisfacer los consumos del sistema que se pretende abastecer. En la mayor parte de los casos se desconoce la capacidad de la central para entregar estas energías que siguen las fluctuaciones mensuales de los consumos deficitarios. Por esta razón es necesario iniciar una serie de procesamientos, en que se partirá de una generación anual dada, distribuida mensualmente de acuerdo a los déficit; y se irá aumentando hasta que la central se encuentre imposibilitada para satisfacerla por falta de capacidad. La energía firme representativa de la central será la correspondiente a la última operación que pudo ser completada sin fallas.

La mejor manera de llevar a cabo la operación anterior es programando una serie de ciclos con valores de energía firme crecientes. En esta forma será fácil reconocer el último valor que pudo ser satisfecho en el proceso.

M. Regla de operación del Embalse :

Se define por los volúmenes que se desea se encuentren acumulados en el embalse a finés de cada mes. Esta regla puede determinarse de modo de maximizar la energía media anual o bien la energía

firme de la central. En general, se procede entregando al computador una regla aproximada, que posteriormente puede irse perfeccionando en las operaciones subsiguientes, hasta lograr el objetivo deseado. El proceso de cálculo es idéntico al del caso de malla de alerta.

N. Valores de Bombeo :

Esta tarjeta se agrega sólo si el ciclo incluye bombeo ( $LBOMB \neq 0$ ). Deberá indicarse aquí la suma de las potencias máximas de las bombas, expresada en MW, el caudal nominal total descargado por las bombas y la altura nominal (neta) de ellas. Además deberá indicarse la pérdida de carga entre la aspiración y la descarga de las bombas correspondientes al caudal máximo posible de elevar, y la cota de aspiración de las bombas, o de descarga de las turbinas cuando se trate de grupos reversibles. Las cotas se expresarán en el mismo sistema que las de los volúmenes embalsados.

O. Regla del Bombeo : (mill  $m^3$ )

Tal como en el caso anterior, esta tarjeta se incluirá sólo cuando se consulte bombeo en el estudio de simulación. Se indicarán aquí los niveles que se desea alcanzar en el embalse a fines de cada mes mediante el bombeo, expresados en el mismo sistema de cotas.

El volumen por bombear se determina en el programa suponiendo que primero se extrae el volumen para satisfacer la generación y luego se efectúa la elevación.

La regla de niveles exigida por el bombeo no se cumplirá si la capacidad de las bombas o el tiempo de bombeo es insuficiente. Este hecho podrá reconocerse en los resultados comparando el volumen final de mes del embalse con el volumen fijado por la regla.

DATOS GENERALES

IDENTIFICACION DE LA OPERACION

TIPO DE PRUEBA								NOMBRE DE LA CENTRAL												FLUCT. MAX.		NOMBRE DEL OPERADOR												FECHA DD/MM/AA		C T
1								12 13												40 41 M. 44 45		71 72												79 80		
																																				A

DATOS BASICOS

NUMERO CICLOS	FECHA INICIAL		NUMERO AÑOS ESTADIST.	INDICADOR DE			Nº DE PTOS. DE CURVA DE		EFICIENCIA DE		C T										
	MES	AÑO		IMPRES. MEHS.	BOM- BEO	FILTRA- CION	EM- BALSE	DES- CARGA	FILTRA- CION	CENTRAL		BOMBEO									
1	2	3	4	5	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	24	25	29	80
																					B

CAUDALES MINIMOS MENSUALES POR ENTREGAR (M<sup>3</sup>/SEG.)

ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	C T												
6	7	12	13	18	19	24	25	30	31	35	37	42	43	48	49	54	55	60	61	66	67	72	73	80
																								C

INDICADOR DE ESCRITURA DE LA ESTADISTICA

(1: IMPRIME ESTADISTICA AFLUENTE ; CERO o BLANCO : NO IMPRIME )																								C T	

PREPARADO POR : FECHA :	OF :	RECIBIDO POR : FECHA :	PERFORADO :	VERIFICADO :
----------------------------	------	---------------------------	-------------	--------------



ENDESA

OPERACION SIMULADA DE CENTRALES HIDROELECTRICAS  
CENTRAL \_\_\_\_\_

PAG. \_\_\_\_  
DE \_\_\_\_

CURVAS DE EMBALSE Y DESCARGA  
TIEMPO MAXIMO DE BOMBEO

NIVELES DEL EMBALSE (M)

H1 (H13)	H2 (H14)	H3 (H15)	H4 (H16)	H5 (H17)	H6 (H18)	H7 (H19)	H8 (H20)	H9 (H21)	H10 (H22)	H11 (H23)	H12 (H24)		C
1	6 7	12 13	18 19	24 25	30 31	36 37	42 43	48 49	54 55	60 61	66 67	72 73	79 80

VOLUMENES CORRESPONDIENTES (MILLONES DE M<sup>3</sup>)

V1 (V13)	V2 (V14)	V3 (V15)	V4 (V16)	V5 (V17)	V6 (V18)	V7 (V19)	V8 (V20)	V9 (V21)	V10 (V22)	V11 (V23)	V12 (V24)		C
1	6 7	12 13	18 19	24 25	30 31	36 37	42 43	48 49	54 55	60 61	66 67	72 73	79 80

NIVELES DE DESCARGA (M)

H1 (H13)	H2 (H14)	H3 (H15)	H4 (H16)	H5 (H17)	H6 (H18)	H7 (H19)	H8 (H20)	H9 (H21)	H10 (H22)	H11 (H23)	H12 (H24)		C
1	6 7	12 13	18 19	24 25	30 31	36 37	42 43	48 49	54 55	60 61	66 67	72 73	79 80

CAUDALES DE DESCARGA (M<sup>3</sup>/SEG.)

Q1 (Q13)	Q2 (Q14)	Q3 (Q15)	Q4 (Q16)	Q5 (Q17)	Q6 (Q18)	Q7 (Q19)	Q8 (Q20)	Q9 (Q21)	Q10 (Q22)	Q11 (Q23)	Q12 (Q24)		C
1	6 7	12 13	18 19	24 25	30 31	36 37	42 43	48 49	54 55	60 61	66 67	72 73	79 80

TIEMPO MAXIMO ADMISIBLE DE BOMBEO (°/1)

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC		C
1	6 7	12 13	18 19	24 25	30 31	36 37	42 43	48 49	54 55	60 61	66 67	72 73	79 80

PREPARADO POR:  
FECHA:

RECIBIDO POR:  
FECHA:

PERFORADO:

VERIFICADO:



VALORES PROPIOS DE CADA CICLO  
OPERACION N° \_\_\_\_\_

INDICADOR DE MALLA DE ALERTA

INDICADOR MALLA DE ALERTA																								C T
NUMERO DE ESTADOS MALLA DE ALERTA (NNIV)																								

OPCIONAL : MALLA DE ALERTA (Son NNIV tarjetas)

VARIACION DE CAUDAL EMBALSADO (m <sup>3</sup> /seg/mes)																								EST. INICIAL (m <sup>3</sup> /seg/mes)	C T												
MES 1	6	7	MES 2	12	13	MES 3	18	19	MES 4	24	25	MES 5	30	31	MES 6	36	37	MES 7	42	43	MES 8	48	49			MES 9	54	55	MES 10	60	61	MES 11	66	67	MES 12	72	73

VOLUMEN EMBALSADO ADMISIBLE						COTA INICIAL DEL EMBALSE			PERDIDA DE CARGA MAXIMA			CAUDAL MAXIMO ADMISIBLE			POTENCIA CENTRAL			ALTURA DE CAIDA HPMAX			C T		
MINIMO	6	7	MAXIMO	12	13	M.	18	19	M.	24	25	M <sup>3</sup> /SEG.	30	31	MW	36	37	M.	42				

DEMANDA MENSUAL DE ENERGIA FIRME (GWH)

ENE	6	7	FEB	12	13	MAR	18	19	ABR	24	25	MAY	30	31	JUN	36	37	JUL	42	43	AGO	48	49	SET	54	55	OCT	60	61	NOV	66	67	DIC	72		C T

OPCIONAL : REGLA DE OPERACION DEL EMBALSE (MILL. M<sup>3</sup>)

ENE	6	7	FEB	12	13	MAR	18	19	ABR	24	25	MAY	30	31	JUN	36	37	JUL	42	43	AGO	48	49	SET	54	55	OCT	60	61	NOV	66	67	DIC	72		C T

PREPARADO POR :  
FECHA :

RECIBIDO POR :  
FECHA :

PERFORADO :

VERIFICADO :

ENDESA

OPERACION SIMULADA DE CENTRALES HIDROELECTRICAS  
CENTRAL \_\_\_\_\_

PAG. \_\_\_\_  
DE \_\_\_\_

VALORES PROPIOS DE CADA CICLO  
OPERACION N° \_\_\_\_

VALORES DE BOMBEO

VALORES NOMINALES DE LAS BOMBAS												PERDIDA DE CARGA DE BOMBAS M.	COTA DE DESCARGA DE BOMBAS M.	CT
POTENCIA MW.	CAUDAL M <sup>3</sup> /SEG.		ALTURA DE ELEVACION M.											
1	6	7	12	13	18	19	24	25	30	31		80		
												N		

REGLA DEL BOMBEO (MILL. M<sup>3</sup>)

ENE	FEB		MAR		ABR		MAY		JUN		JUL		AGO		SET		OCT		NOV		DIC		CT	
1	6	7	12	13	18	19	24	25	30	31	36	37	42	43	48	49	54	55	60	61	66	67	72	80
																							0	

PREPARADO POR : FECHA :	RECIBIDO POR : FECHA :	PERFORADO :	VERIFICADO :
----------------------------	---------------------------	-------------	--------------

## DESCRIPCION DE LA OPERACION SIMULADA DEL PROGRAMA

Para realizar la operación simulada se debe contar con la siguiente información : a) estadística de caudales medios afluentes al embalse; b) caudales medios mensuales requeridos por los usuarios de aguas abajo; c) curvas del embalse  $V = f(H)$  (por puntos); d) curva de alturas de descarga en función del caudal de descarga  $h=f(Q)$  (por puntos); e) características de la turbina y del generador; f) caudal máximo posible de descarga a través de las turbinas; g) altura a la cual se alcanza la potencia máxima del generador, encontrándose las turbinas operando con abertura plena; h) las energías firmes mensuales requeridas por el sistema abastecido; i) la norma de operación del embalse.

Para realizar estudios con bombeo es necesario suministrar la información adicional siguiente : j) características de las bombas, k) tiempo máximo de bombeo de cada mes; l) regla de operación del embalse con los volúmenes que se desea alcanzar mediante el bombeo; m) la cota correspondiente al nivel de aguas en el punto de aspiración de las bombas; y n) la pérdida de carga máxima que se produce en el proceso de elevación.

Si se desean considerar pérdidas por filtraciones desde el embalse deberá agregarse a los antecedentes anteriores la curva característica de las filtraciones; o) :  $Q_{fil} = f(H)$  (por puntos).

A fin de obtener puntos intermedios de las curvas  $V = f(H)$ ,  $h = f(Q)$  y  $Q_{fil} = f(H)$  se ha incluido al final del programa la subrutina INTER, que permite interpolar entre los puntos que definen la curva.

El proceso de simulación se inicia aceptando que se debe cumplir la norma de operación del embalse. Con posterioridad se comprueba que el volumen extraído sea suficiente para satisfacer tanto las demandas aguas abajo de la central como las de energía firme requeridas por el sistema. Si el volumen resulta ser insuficiente, la norma de operación es trasgredida de manera de satisfacer estas demandas. En esta etapa se comprueba que el volumen extraído no sea

superior al que se dispone en el embalse. Si resulta ser superior, el programa cancelará el resto de la operación y emitirá un mensaje indicando el mes y año en que se produjo este hecho y el volumen deficitario.

La fluctuación del caudal descargado y de la potencia desarrollada por la turbina con la cota del embalse y plena abertura del regulador se ha introducido en los cálculos mediante las siguientes ecuaciones, obtenidas de los gráficos de la Figura 5 del folleto "Selecting Hydraulic Reaction Turbines" (U.S. Bureau of Reclamation) :

Caudal de descarga a plena abertura :

$$\frac{QCAP}{QMAX} = 0,632 \times \frac{HNET}{HPMAX} + 0,368$$

Potencia a plena abertura, medida en bornes del generador :

$$\frac{P}{PMAX} = 1,553 \times \frac{HNET}{HPMAX} - 0,553$$

ambas ecuaciones son una linealización de respectivamente las ecuaciones  $\frac{QCAP}{QMAX} = \left(\frac{HNET}{HPMAX}\right)^{1/2}$  y  $\frac{P}{PMAX} = \left(\frac{HNET}{HPMAX}\right)^{3/2}$ , que son válidas para todo tipo de turbina. La adopción de las ecuaciones linealizadas obedece a razones de simplificación y de mayor rapidez de operación del programa mediante el uso del computador. Las ecuaciones linealizadas son suficientemente precisas dentro del rango  $0.65 \leq HNET/HPMAX \leq 1.25$ .

En la Figura 1 se grafican estas expresiones.

Dentro del programa también se consulta el cálculo del caudal máximo (QCAP) y de los volúmenes máximos que pueden extraerse del embalse a través de las turbinas. Si el volumen por extraer determinado por la regla de operación del embalse es superior al que puede obtenerse a través de la descarga de las turbinas, no se respetará la regla y se extraerá el volumen que puede entregarse con las unidades operando a plena carga. El resto se dejará embalsado. Ahora, si este resto no tuviese cabida en el embalse, se completará primero su capacidad y el sobrante registrará como volumen vertido por rebase.

# CARACTERISTICAS DE LA TURBINA INTRODUCIDAS EN EL PROGRAMA

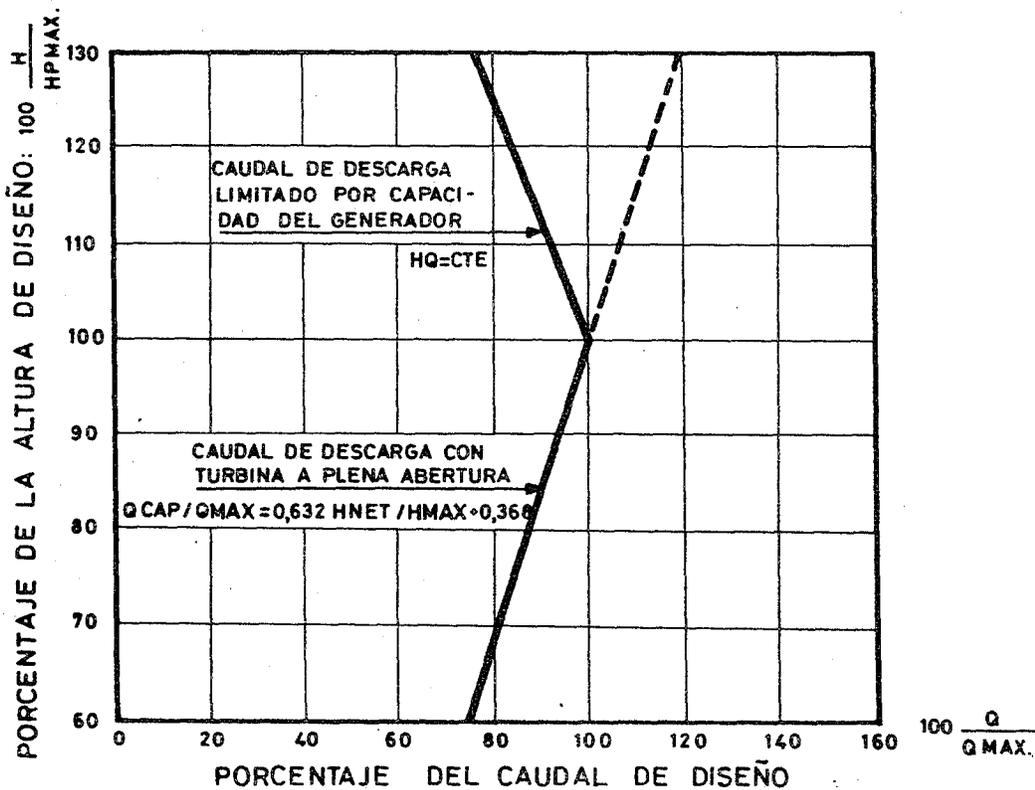
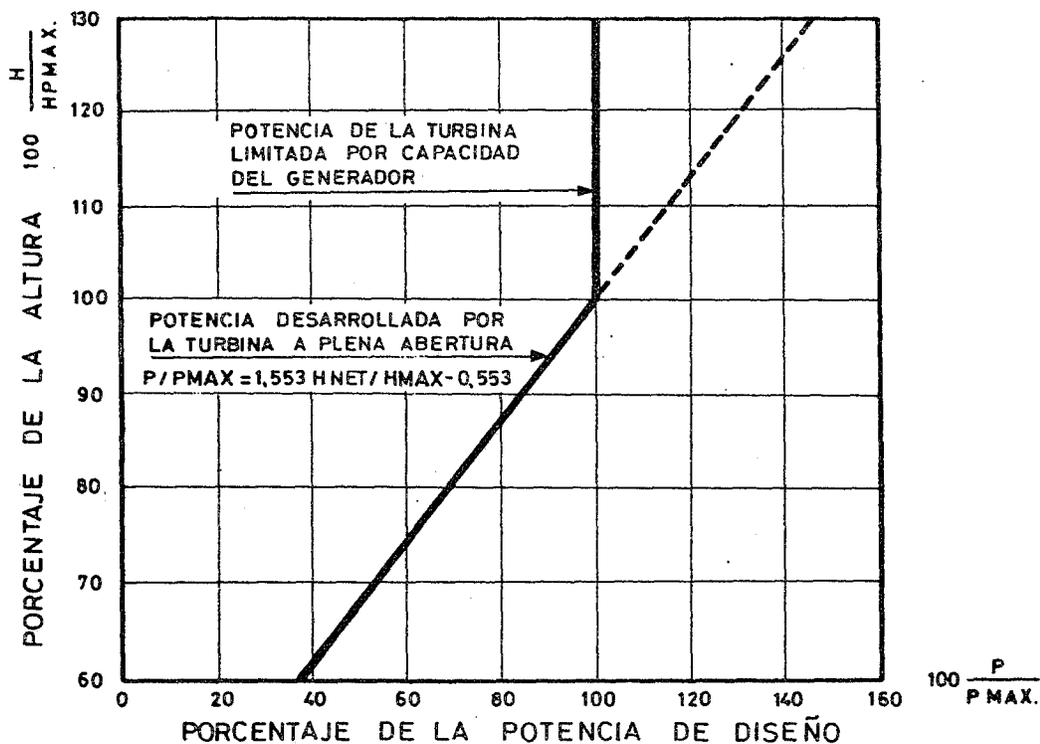


FIGURA 1

Para lograr una precisión suficiente en esta operación (tratando que  $VOLEFL = VCAP$ ), se ha empleado un proceso iterativo con un máximo de 50 pasadas, después de las cuales el computador emite un mensaje y abandona la ejecución del ciclo para comenzar el siguiente. Como el proceso empleado es fuertemente convergente, resulta prácticamente imposible no llegar a la precisión deseada (0,5%) después del citado número de iteraciones.

Cuando el proceso incluye filtraciones, se ponen en operación dentro del programa varios procesos iterativos convergentes, que garantizan que el volumen turbinado, dentro de una precisión del 1%, será igual al volumen determinado ya sea por la regla de operación o por alguno de los requisitos de energía firme o requerimientos de aguas abajo. Aquí también se acepta un máximo de hasta 50 iteraciones.

Si el volumen por extraer queda determinado por requisitos de energía o necesidades de aguas abajo, y con posterioridad se comprueba que es imposible descargarlo a través de las turbinas (por falta de capacidad de ellas), el programa, después de emitir un mensaje explicativo, se detendrá.

Una vez que ha sido determinado el volumen efluente del embalse que cumple con todos los requisitos exigidos, se calcula la energía mensual (o del período considerado) que generará la central, el caudal de rebase y la energía perdida por rebases. Para calcular esta última se toma en cuenta la altura neta resultante con el nivel de embalse máximo y cota de descarga correspondiente al caudal total.

El ciclo de bombeo se realiza a continuación del ciclo de generación y en una forma similar a éste, sólo que ahora se hace necesario calcular previamente los coeficientes alfa y beta definidos en el diagrama de flujo para determinar la capacidad máxima de la elevación.

Con estos procesos se finaliza la operación propiamente tal del embalse, imprimiéndose los resultados mensuales y los promedios anuales. Lo que continúa desde este punto hasta el final del programa es sólo una selección y elaboración de cifras de la operación. Así por ejemplo, se seleccionan las cotas mínimas mensuales comparando las cotas iniciales de mes con las finales, y a partir de estos resultados se determinan las potencias de punta mínimas que se pueden desarrollar en cada mes del estudio. También se determinan las alturas

netas mínimas de todos los meses enero, de todos los meses febrero, etc. A partir de estos resultados se obtienen las potencias de punta mínimas que se pueden entregar en cada uno de los meses del año y el número de horas diarias que la central puede operar entregando dichas potencias.

LISTA DE LOS ESTUDIOS MAS IMPORTANTES QUE  
PUEDEN REALIZARSE MEDIANTE EL PROGRAMA

1. Determinación de la capacidad de generación para distintas potencias instaladas de la central.
2. Determinación de la energía firme que puede entregar la central con distintas potencias.
3. Determinación de la fluctuación óptima del embalse de alimentación.
4. Estudio de la norma de operación del embalse y de sus efectos sobre la generación y energía firme.
5. Determinación de la altura de potencia máxima.
6. Estudios de centrales de bombeo operando ya sea en forma aislada o asociadas a centrales generadoras.
7. Estudio de la incidencia de la norma de operación sobre las filtraciones del embalse y de éstas sobre la generación anual de la central.

EFIRM	:	energía firme que puede entregar la central en el mes considerado (GWh)
ENANME	:	energía anual media, calculada como valor promedio de las generaciones anuales (GWh)
ENERB	:	energía mensual consumida en bombeo (GWh)
ENFIAN	:	energía firme anual, obtenido como suma de las energías firmes mensuales (GWh)
ENINV	:	promedio total de la energía de invierno
ENMEDB	:	energía media de bombeo, computada como valor promedio de todas las energías anuales consumidas en bombeo (GWh)
ENREB	:	energía que representan los volúmenes rebasados (GWh)
ENREMD	:	energía media anual perdida en rebases (GWh)
EST	:	estados o niveles en que se subdivide el embalse en la malla de alerta
ESTMIN	:	nivel mínimo de la malla de alerta
FILTR	:	caudales de filtración correspondientes a la curva $QFIL = f(H)$ ( $m^3/s$ )
FP y FPL	:	factor de planta mensual (en caudales)
FIN	:	indicador de fin de lectura de datos
GAT	:	símbolo #
H	:	altura neta de caída calculada en primera aproximación (m)
HDIS	:	promedio ponderado de HNET con E (altura media ponderada)
HMIN	:	altura de caída neta mínima que se presenta dentro del período de operación
HNET	:	altura de caída neta de cada mes (m)
HNOM	:	altura nominal de las turbinas (m)
HPCMAX	:	pérdida de carga máxima que puede producirse (con caudal máximo) entre el punto de captación y la descarga de la central (m)
HPMAX	:	altura de caída neta para la cual la turbina con abertura total del regulador entrega la potencia máxima que soporta el generador en forma permanente (m)

HREB : altura de caída neta que existe cuando las turbinas operan a plena abertura, encontrándose el nivel de aguas en el embalse a la cota del umbral del vertedero (m)

HRPTA : número de horas diarias que la central puede operar a plena carga (hrs)

I : índice contador del número de años

IBCOM : variable auxiliar

ICAP : indicador de paso por el circuito que se preocupa que no se produzcan rebases indebidos. El paso por la rama se registra con el signo +

IDENT : indicador de identificación

IDIF : indicador de paso por la rama que obliga a generar por lo menos la energía firme. El paso se registra con el signo #

INDQAF : indicador de escritura de la estadística de afluentes

INDMA : indicador de existencia de malla de alerta

IERR : variable auxiliar utilizada en la subrutina de interpolación

II : variable auxiliar que registra el paso por la rama en que la altura es mayor o menor que la que permite entregar la potencia total del generador

IMP : indicador de impresión

INTER : denominación de la subrutina de interpolación

INY : año IY expresado en sus cuatro cifras

IQEFL : indicador de paso por la rama en que el volumen efluente queda determinado por los requerimientos de aguas abajo. El paso por la rama se registra con un asterisco

IY : año en que se produce el nivel mínimo de aguas en el embalse

J : contador de los meses

JC : contador de los meses calendarios (enero = 1, diciembre = 12)

JJ : mes en que se produce el déficit máximo de potencia. Se utiliza en la determinación de la potencia firme.

K : número de ciclos  
KAC : contador de los años impresos, usado en el control del cambio de páginas  
KK : indicador de paso por la rama que determina el volumen efluente de manera que se cumpla con el requisito de energía firme, o bien por la rama en que no se requiera de esta corrección  
KN : contador relacionado con el contador de años impresos  
KV : contador de las iteraciones del circuito que garantiza la generación de energía firme.

LBOMB : indicador de ejecución de estudio de bombeo  
LEC : variable auxiliar  
LFIL : indicador de ejecución de estudio de filtraciones  
LFORM : indicador de tipo de formato por usar, con impresión mensual o anual

MESA : totalizador del número de meses de la operación simulada  
MESI : mes calendario en que se inicia el estudio  
MESI 1 : variable auxiliar  
MESO : control de los números de días de cada mes

NANOS : número de años que consulta el período del estudio  
NAP : número de años por imprimirse en cada página, a excepción de la 1.  
NAP 1 : número de años por imprimir en la primera página  
NB : año expresado en sus cuatro cifras  
NC : contador de uno de los procesos iterativos en el estudio de filtraciones  
NCICL : número de ciclos que consulta la operación  
NF : número de puntos de la curva de filtraciones  
NIV : niveles de embalse correspondientes a la curva de filtraciones (m)  
NIVE : niveles de embalse correspondientes a la curva de volúmenes embalsados (m)

NIVDES	:	niveles de descarga correspondientes a la curva de alturas de descarga en función del caudal (m)
NIVMAX	:	cota del nivel de aguas máximas del embalse
NP	:	número de puntos de la curva de volúmenes embalsados
NPAS	:	contador del número de iteraciones tratando de lograr la igualdad entre VCAP y VOLEFL
NPT	:	contador del número de iteraciones agregadas
NQ	:	número de puntos de la curva de descarga
NV	:	contador del número de iteraciones en el proceso del cálculo de filtraciones
NNIV	:	número de niveles o estados de la malla de alerta
P	:	potencia de punta mínima que puede desarrollar la central en el mes (MW) (con las turbinas a abertura plena)
PER y PERD	:	coeficiente de pérdida de carga
PMAX	:	potencia máxima que puede entregar la central
PMES	:	potencia de punta que puede desarrollar la central en el mes (valor medio del mes) (MW)
PNOM	:	suma de las potencias nominales de los generadores con que cuenta la central, o potencia nominal de la central (MW)
PPMIN	:	potencia de punta mínima dentro de todo el período del estudio (MW)
PROM	:	promedios anuales del caudal afluente
PROMT	:	promedio total del caudal afluente
PROMM	:	promedios mensuales del caudal afluente
QAFL	:	caudal afluente al embalse en $m^3/s$
QCAP	:	caudal máximo que puede descargar la central en las condiciones existentes de nivel de aguas en el embalse ( $m^3/s$ )
QDESC	:	caudales de descarga correspondientes a la curva de descarga ( $m^3/s$ )
QEFL	:	caudal efluente del embalse ( $m^3/s$ )
QEFLM	:	promedio total de QEFL
QFIL	:	caudales de filtraciones correspondientes a la curva de filtraciones ( $m^3/s$ )



TIEMPOS DE PROCESO

Para una estadística de 30 años se recomienda con siderar un tiempo promedio de computador empleado de 1,5 minutos por cada ciclo de operación. Para estadísticas mayores o menores se considerará tiempos proporcionales.