

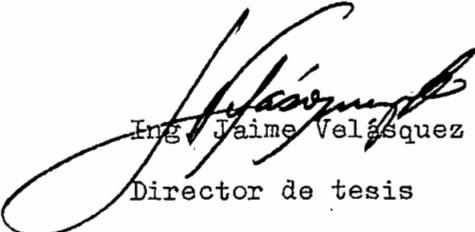
"BASES Y CRITERIOS PARA LOS ESTUDIOS  
DE UNA UTILIZACION HIDROELECTRICA"

Tesis Previa a la Obtención del Título de  
Ingeniero en la Especialización de Electrote  
cnicia de la Escuela Politécnica Nacional.

Omar Lombeyda

Quito, Noviembre de 1.972

Certifico que la presente tesis  
fue elaborada por el señor  
Omar Lombeyda



Ing. Jaime Velásquez  
Director de tesis

## P R E F A C I O

El presente trabajo tiene como antecedentes la experiencia del autor de haber laborado varios años en la explotación de recursos eléctricos, especialmente centrales hidráulicas, y de observaciones en importantes instalaciones hidroeléctricas en el exterior. Esta experiencia le ha permitido adquirir un conocimiento objetivo del alcance de los aprovechamientos hidroeléctricos, lo mismo que de los problemas que envuelve su planeamiento y de sus proyecciones en la economía de los sistemas y de las empresas encargadas de explotarlos.

Precisamente, al analizar este aspecto de la economía en las empresas eléctricas de nuestro país, se pueden descubrir los males casi crónicos de desfinanciamiento y de falta de capacidad para abastecer la demanda muchas veces incipiente de los consumos de provincia; males los dos provenientes de la carencia de programas de expansión que permitan evaluar sistemáticamente el mercado, e investigar los recursos hidráulicos, con miras a planificar el abastecimiento de la demanda.

Vista esta realidad a la luz de la experiencia, ha sido posible pensar en la utilidad de organizar con

sentido práctico los diferentes criterios que se emplean en la concepción, el planeamiento y los estudios de una utilización hidroeléctrica, y establecer un mecanismo sistematizado que sirva como guía para la investigación y el aprovechamiento de los muchos recursos con que cuenta el país; siendo justamente ese el objetivo de este trabajo: sentar bases y emitir criterios sobre los diferentes aspectos que comprenden el planeamiento de una utilización, sin pretender profundizar ningún tema, y menos entrar en el cálculo o diseño de las instalaciones, pues cada uno de los tópicos aquí tratados es tan importante por si solo, que bien podría ser motivo de un estudio completo de mayores dimensiones.

No obstante, con ser la mayor aspiración del autor que este estudio no haya de servir tan solo para su propio perfeccionamiento, sino que llegue a ser de utilidad en la consulta de estudiantes que vayan a iniciarse en este campo, mayor énfasis se ha puesto en las materias que son de dificultosa búsqueda en los libros de texto, habiéndose incluido algunos desarrollos matemáticos indispensables y pocos ejemplos de cálculo, con la finalidad de aclarar ciertos aspectos teóricos de complicada explicación.

Se ha pensado por último en que podría ser un modesto aporte que contribuya a ordenar el cúmulo de cono

cimientos obtenidos en las aulas, y a orientar su aplicación, con la seguridad de que ninguno de los temas tratados será desconocido por los estudiantes, pues no constituyen innovación alguna, sino más bien, se trata de los mismos conocimientos que ellos poseen, seleccionados y organizados para su aplicación en este problema específico del planeamiento de una utilización hidroeléctrica.

## INDICE GENERAL DE MATERIAS

	Pag.
Capítulo I Investigación de la Demanda	
1.1 Introducción	1
1.2 Programa de demada y suministro	3
1.3 Estimación de los requerimientos de energía y de la curva de carga	4
1.4 Energía en los terminales de generación	7
1.5 Disponibilidad de potencia hidroeléctrica	8
1.6 Expresión de la disponibilidad	9
1.7 Capacidad termoeléctrica	15
1.8 Balance de demanda y suministro	17
Capítulo II Investigación de la Cuenca Hidrográfica	
2.1 Introducción	20
2.2 Selección del sitio del proyecto	22
2.3 Estudios hidrológicos	25
2.4 Estudios meteorológicos	29
2.5 Reconocimiento y estudios de campo	30
Capítulo III Elaboraciones Hidrológicas	
3.1 Introducción	34
3.2 Registros hidrológicos	34
3.3 Características hidrológicas	38
3.4 Afluencia	41

3.5 Análisis del gasto	45
Caudal firme	45
Regulación del caudal	47
Caudal de avenida	49

#### Capítulo IV Bases y Criterios para el Planeamiento de la Utilización

4.1 Desarrollo integral de la cuenca	55
4.2 Análisis de los almacenamientos	60
Capacidad de almacenamiento	62
Regulación de la descarga	65
Area y volumen del almacenamiento	69
4.3 Alcance de los proyectos	71
4.4 Características de las centrales	75
Instalaciones componentes de las centrales	77
4.5 Valoración económica de las plantas hidráulicas	83

#### Capítulo V Bases y Criterios Para el Diseño

5.1 Obras de contención y seguridad	92
a) Azudes	92
b) Presas de material suelto	94
c) Presas de obra de fábrica	101
d) Aliviaderos de las presas	107
5.2 Obras de captación y conducción	111
a) Rejillas	112

b) Compuertas	113
c) Obras de conducción	115
1) Características de los canales	117
2) Características de los túneles	118
3) sobrepresiones en los conductos	121
4) Características de las tuberías de presión	124
5.3 Central generadora	127
a) Clasificación de acuerdo al tipo de construcción	128
b) Clasificación de acuerdo a la forma de instalación de las unidades generadoras	131
e) Planeamiento de la distribución interna de la central.	133
d) Selección del número de unidades	141
e) Turbina	145
1) Velocidad específica	147
2) Velocidad de giro	149
3) Eficiencia de las turbinas	150
4) Altura de succión	151
5) Selección del tipo de turbina de acuerdo a la forma de instalación	153
6) Efecto de las variaciones de velocidad	157
f) Generador	162
1) Potencia	164
2) Eficiencia	165

3) Excitación	165
4) Voltaje	166
5) Efecto volante	167
6) Peso	168
g) Sistemas de protección y control	169
1) Protección de los generadores	169
2) Mecanismos de control	173
h) Equipo auxiliar	179
i) Subestación	185
Capítulo VI Bases y Criterios para la Elaboración de Especificaciones y contratación de la Construcción	196
6.1 Sistema de contratación	198
6.2 Preparación de las especificaciones para la cons trucción	199
a) Instrucciones a los proponentes	199
b) Formato de la propuesta	200
c) Cartilla de precios y cantidades	201
d) Modelo de contrato	201
e) Condiciones del contrato	202
f) Especificaciones y condiciones técnicas de la obra	203

## INDICE DE GRAFICOS

Gráfico	Figura		Pag.
1.1	1	Curva de carga de un día ordinario	7a
1.1	2	Duración aproximada de la demanda	7a
1.2	1	Disponibilidad diaria regulada	8a
1.2	2	Curva de duración de la demanda	8a
1.3		Determinación de la disponibilidad promedial	11a
1.4	1	Regulación de la disponibilidad	13a
1.4	2	Curva de máximas potencias reguladas	13a
2.1	1	Descargas características en el año	26a
2.1	2	Curva de gastos	26a
3.1	1	Diagrama cronológico de caudales	35a
3.1	2	Diagrama integral de caudales	35a
3.2	1	Diagrama de duración de caudales	36a
3.2	2	Curva de potencias máximas obtenibles	36a
3.3	1	Alcance de la regulación de los caudales	39a
3.3	2	Diagrama de concentración	39a
3.4		Escurrimiento y afluencia	43a
3.5	1	Caudal firme	45a
3.5	2	Descargas en años diferentes	45a
3.6	1	Regulación de los caudales	47a
3.6	2	Regulación completa del caudal	47a
3.7		Ocurrencia de las crecientes	52a

Gráfico Figura			Pag.
4.1	1	Distribución de las capacidades de almacenamiento	61a
4.1	2	Compensación con el caudal medio	61a
4.2		Determinación de la capacidad de almacenamiento	63a
4.3	1	Almacenamiento con descargas variables	65a
4.3	2	Almacenamiento con descargas constantes	65a
4.4		Area y volumen de almacenamiento	70a
4.5	1	Capacidad de compensación diaria	72a
4.5	2	Generación pura a base de bombeo	72a
4.6	1	Centrales a circulación natural	76a
4.6	2	Centrales con obras de contención	76a
4.6	3	Centrales de tipo combinado	76a
5.1	1	Presa homogénea	95a
5.1	2	Presa zonificada	95a
5.1	3	Presa de núcleo central	95a
5.2	1	Presa de núcleo inclinado	97a
5.2	2	Presa de membrana superficial	97a
5.3		Presa de gravedad	103a
5.4		Presa de arco	104a
5.5		Tipos de vertederos	109a
5.6		Centrales subterránea y superficial	130a
5.7		Central de un solo piso	133a
5.8		Central de dos pisos	133b

Gráfico	Figura	Pag.
5.9	Central de pisos múltiples	133c
5.10	Central semisubterránea	141a
5.11	1 Eficiencia de las turbinas	151a
5.11	2 Coeficiente de "Thoma"	151a
5.12	1 Forma de instalación de las turbinas	154a
5.12	2 Selección del tipo de turbina	154a
5.13	1 Peso de las turbinas y accesorios	161a
5.13	2 Eficiencia de los generadores	161a

## INDICE DE ANEXOS

Pag.

1.1	Determinación de los requerimientos de energía para un día ordinario	19a
1.2	Eficiencia en la operación de bombeo	19b
1.3	Programa de mantenimiento para el grupo de plantas térmicas	19c
2.1	Utilización de las observaciones meteorológicas	33a
3.1	Registro de las crecientes de un curso de agua para un período de 54 años	54a
4.1	Ejemplo de cálculo de la eficiencia de un reservorio	88
4.2	Cálculo del volumen de almacenamiento para un reservorio con descargas variables por períodos mensuales:	
	a) Regulación de la descarga media anual	89
	b) Regulación con descargas variables	90
4.3	Determinación del volumen de almacenamiento en un depósito de compensación diaria	91
5.1	Cálculo de la potencia de salida de una central	193
5.2	Velocidades sincrónicas normalizadas para generadores accionados por turbinas hidráulicas	195
6.1	Tabla de las normas técnicas internacionales más usadas en las especificaciones de los proyectos hidroeléctricos	205



## CAPITULO I INVESTIGACION DE LA DEMANDA

### 1.1. Introducción

La electricidad es una forma de energía que se caracteriza por la simultaneidad entre su producción y su consumo. Por esta razón, la manera de transportarla desde - las centrales generadoras hasta los consumidores es diferente de la usada en otras formas de energía, pues el despacho y la recepción ocurren en coincidencia, sin que exista la posibilidad de almacenarla.

El único medio de manejar la electricidad, - en su forma más común para los usos industrial y doméstico, es el empleo de los llamados sistemas eléctricos. Estos sistemas, que en sus primeras manifestaciones estaban formados - por un generador de corriente continua y su propio consumidor o grupo de consumidores, fueron creciendo e interconectándose para encarar el aumento de la demanda, hasta llegar a ser en la época actual los complejos sistemas de abastecimiento de las grandes urbes administrados por gigantescos monopolios.

El increíble desarrollo industrial y tecnológico de las últimas décadas ha obligado a las empresas encargadas de la explotación de los recursos y sistemas eléctricos

a establecer planes coherentes y lógicos para su propio desarrollo, a fin de enfrentar el crecimiento de la demanda y de resolver los problemas técnicos que su expansión conlleva, aparte de la necesidad de administrar acertadamente las ingentes inversiones a base de la operación económica de los sistemas.

En vista de que es necesario un período considerable de tiempo para la ejecución de las instalaciones o facilidades para el suministro eléctrico -desde las centrales -generadoras hasta las redes de distribución, pasando por las líneas de transmisión y las subestaciones- es imprescindible preparar su desarrollo con la anticipación debida, por lo que los programas deben trazarse para un período razonablemente -prolongado y revisarse cuando las realidades del sistema aconsejen introducir modificaciones.

Entre los muchos aspectos que deben considerarse para el establecimiento de los mencionados programas de desarrollo de los sistemas, el análisis y la proyección de la demanda son los fundamentales.

El confrontamiento entre la demanda estimada para cualquier momento futuro y la disponibilidad del sistema para suplirla, es el objeto del llamado "programa de demanda y suministro", y tiene el propósito de asegurar un abastecimiento de energía estable a los consumidores, así como de per

mitir un desarrollo económico y una operación correcta de los sistemas.

## 1.2. Programa de demanda y suministro

Los programas de demanda y suministro de energía eléctrica se formulan en relación con las finalidades a que se quiera destinarlos. Se pueden concebir programas a corto y a largo plazo, cada uno con sus propias características.

El programa de demanda y suministro a corto plazo se proyecta para tomar medidas que permitan abastecer la demanda de potencia y los requerimientos de energía en un futuro inmediato, lo mismo que para preveer los gastos e ingresos, o programar los consumos de combustible en el caso de generación térmica. Este programa suele hacerse para el año o los dos años subsiguientes.

El programa de demanda y suministro a largo plazo se propone principalmente establecer las necesidades futuras a fin de programar la ejecución de los sistemas, en especial de las instalaciones generadoras, lo mismo que planear el desarrollo de nuevos recursos energéticos para un período de cinco a diez años venideros.

### Programa a corto plazo

Este programa se basa en las estimaciones del

balance mensual entre la demanda y la disponibilidad en el sistema y tiene la finalidad de planear el abastecimiento de energía para todo el año, mediante asignaciones de carga diaria, semanal, o estacional, que permitan la operación racional de las instalaciones de generación. Para llegar a una correcta estimación de dicho balance debe partirse de una ajustada previsión de la demanda usando un método de proyección lógico. Con este propósito, es indispensable examinar y analizar los registros de cargas y requerimientos de energía pasados e investigar las variaciones de consumo y la relación entre las causas que las producen y los efectos que de ellas se derivan.

Por otra parte, es necesario asegurarse del grado de estabilidad que presentan las instalaciones del sistema a base de analizar los registros de operación y examinar sus características de funcionamiento, con lo cual se puede obtener una razonable estimación de las disponibilidades de producción de energía en cuanto se refiere a las mermas producidas por mal funcionamiento o mantenimiento.

### 1.3. Estimación de los requerimientos de energía y de la curva de carga.

Sin embargo de que la estimación de los requerimientos de energía anuales envuelve una serie de factores inciertos que hacen casi imposible una predicción verídica, ésta constituye la base de la formulación del programa de suminis -

tro y demanda. Por esta misma razón se requiere un cuidadoso estudio del asunto y un análisis detenido de todos esos factores.

a) Respecto de la demanda general, formada por los consumos residencial, comercial, alumbrado público y pequeño industrial, su estimación debe hacerse en base a los actuales requerimientos de energía y a los registrados en un período conveniente de los años anteriores, lo mismo que al estudio de la tendencia de crecimiento del número de cargas conectadas y de la potencia instalada por carga.

b) Respecto de la demanda industrial grande la estimación debe nacer después de detenidos estudios de sus planes de expansión o de nuevas instalaciones, de los planes de desarrollo de la nación formulados por el gobierno, de la tendencia de crecimiento del producto industrial, de los contratos celebrados entre los grandes consumidores y las empresas concesionarias, de la instalación de plantas privadas, etc, determinando de este modo sus requerimientos de energía con arreglo al tipo de consumo o clase de industria y a sus propias características.

c) Determinados los requerimientos de energía de las demandas general e industrial se entrará a computar los requerimientos de energía totales para un día ordinario.

(Se entiende por día ordinario el promedial -

de los días de la semana, excluidos los domingos y días de -  
fiesta). Ver ejemplo en Anexo 1.1.

d) El documento que va a servir para el estudio de la distribución de la demanda durante las 24 horas del día ordinario promedial del mes que se proyecta, es la curva de carga promedial de los días ordinarios del mismo mes del año precedente. A base de la energía estimada para un día ordinario del mes que se estudia y la energía para un día ordinario del mismo mes del año precedente, se extrae el factor de corrección que ha de aplicarse a la curva de carga del mes del año precedente para obtener la curva de carga del mes del año que se estudia.

Con el objeto de evitar la aplicación del factor de corrección en cada una de las 24 horas del día de la curva de carga del mes precedente para obtener la curva de carga del mes que se busca, se recurre a establecer dentro de la curva de carga, mediante aproximación, cinco períodos de carga diferenciados, a cada uno de los cuales ha de aplicarse el factor simplificando el cálculo:

- a) Pico nocturno
- b) Pico de la mañana
- c) Pico de la tarde
- d) Transiciones y receso del mediodía
- e) Baja de la madrugada

En el Gráfico 1.1. que corresponde a la curva de carga promedial para los días ordinarios del mes de Diciembre de 1.964 de la ciudad de Guayaquil, puede verse claramente la conformación de dichos períodos y la curva de duración a -proximada de la demanda.

#### 1.4. Energía en los terminales de generación

Existe un elemento muy importante que debe - ser tomado en cuenta que es el de las pérdidas en la transmisión. Las previsiones de demanda de potencia y necesidades de energía, hechas en la forma que queda enunciada, están referidas a los terminales de consumo. Por tanto, deben convertirse en valores a los terminales de generación mediante la aplicación del llamado "factor de pérdidas de transmisión", el que, cuanto más complejo es el sistema, toma valores tan al -tos como un 10 %.

Un caso excepcional es el de nuestro medio en donde se registran valores de hasta 20 % para el factor de -pérdidas, pero es debido al elevado índice de contrabandos<sup>y</sup>al consumo sin medición llamado "fijo".

Determinados los requerimientos de energía y su distribución dentro de la curva de carga del sistema, el siguiente paso es comprobar si existe disponibilidad en las instalaciones de generación para su abastecimiento; y de haberla, determinar la forma de operación más económica y conveniente.

Gráfico 1.1

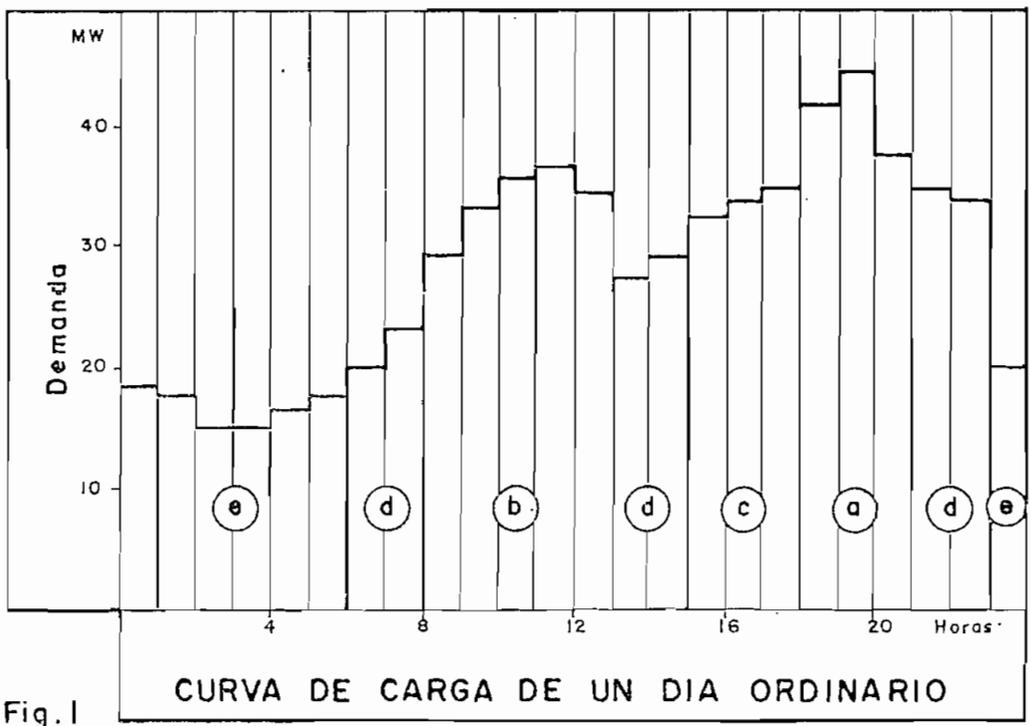


Fig. 1

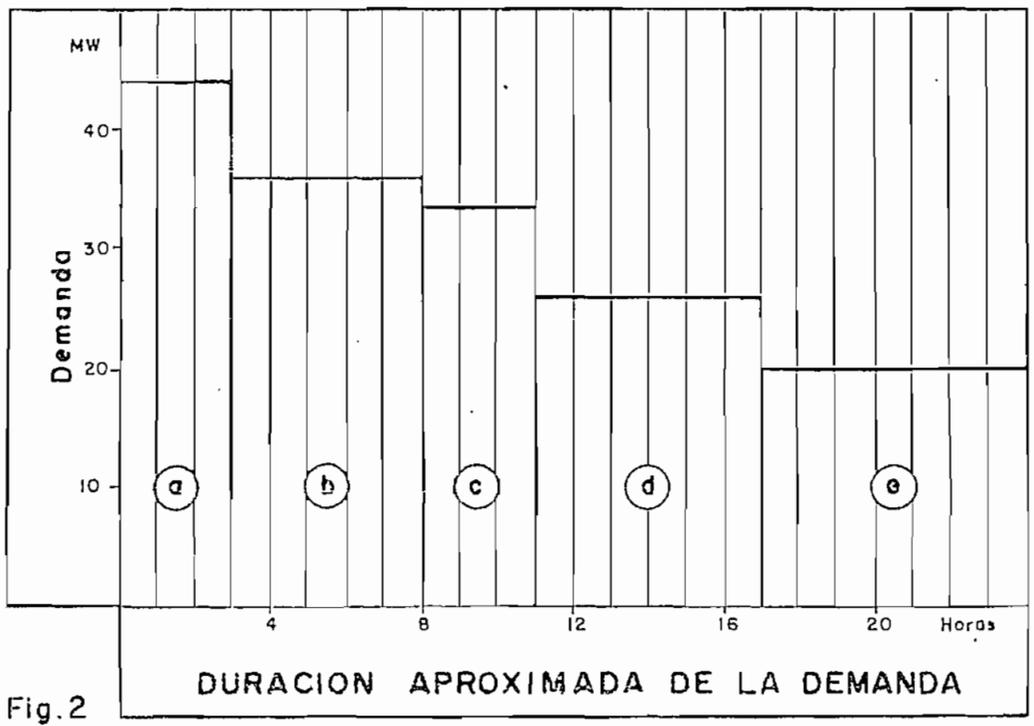


Fig. 2

### 1.5. Disponibilidad de potencia hidroeléctrica

Entiéndese por disponibilidad de potencia hidroeléctrica de una planta la máxima potencia que puede obtenerse con la utilización de todo el caudal disponible en el curso de agua, supuesto de que no hubieran paralizaciones por fallas o mantenimiento. Como se ve, ésta se halla condicionada a las características de caudal de los ríos. Por lo tanto, la disponibilidad de una planta hidroeléctrica, la misma que puede ser sin regulación de caudal o con reservorio de regulación de acuerdo a las características de las instalaciones de que esté provista, se calcula a base de los registros de flujo de la cuenca correspondientes al mayor número de años de que pueda disponerse, promediando los valores anuales de disponibilidad producidos por esos caudales.

Entonces, la disponibilidad de las plantas a circulación natural (entre las que están comprendidas aquellas con almacenamiento para regulación diaria), se puede determinar solamente a base del promedio de energía eléctrica entregada en los años de registro de que se dispongan, en tanto que para las que cuentan con almacenamiento debe tenerse en cuenta además la capacidad de regulación diaria, el flujo disponible y el consumo de agua almacenada en relación con la capacidad instalada de la planta, según puede deducirse del análisis del Gráfico 1.2, figura 1.

Para las plantas con reservorio de gran capa-



cidad de almacenamiento la estimación de la disponibilidad se hace de acuerdo a los programas anuales de consumo de agua y en base a la afluencia promedial de agua hacia los reservorios extraída de los registros de flujo disponibles.

Además de los tipos citados pueden existir las plantas con reservorio de almacenamiento por bombeo. Estas son capaces de bombear el agua usada para generación eléctrica y almacenarla para ser usada nuevamente. El bombeo del agua hacia los reservorios se puede llevar a cabo durante la baja de carga del sistema en la noche, cuando existe un exceso de disponibilidad de energía.

#### 1.6. Expresión de la disponibilidad

La disponibilidad de potencia hidroeléctrica para un día promedio puede calcularse a base de la siguiente ecuación:

$$\text{Disponibilidad} = \text{Caudal natural} + \text{Caudal regulado} - \text{Suspensiones de la operación.}$$

Los valores que componen el segundo término de la igualdad se determinan para las diferentes condiciones de flujo que han de ocurrir en días representativos, en la siguiente forma:

Caudal natural: Se toma la curva de duración de caudales para un mes determinado y en ella se diferencian;

a) El período de mayor cantidad de agua, compuesto por los 5

- días que registran los máximos caudales del mes.
- b) El período de 5 días con caudales menores que los máximos.
  - c) El período de 10 días con los caudales intermedios del mes.
  - d) El período de 5 días con caudales mayores que los mínimos.
  - e) El período de menor cantidad de agua, compuesto por los 5 días que registran los mínimos caudales del mes.

En cada uno de estos períodos se establece el promedio de los caudales registrados, el cual es considerado el caudal representativo del período para la confección de la curva de duración aproximada que se ve en el Gráfico 1.2, figura 2.

Como la disponibilidad es la representación de los datos históricos, corresponde a cada uno de los cinco períodos diferenciados el valor promedio de los valores ocurridos en los mismos períodos de los años de registro que han servido de base para el estudio.

La curva de duración de caudales es, para un mes determinado, equivalente a la curva de disponibilidades de potencia hidroeléctrica en la instalación que utiliza ese caudal. Sin embargo, en tratándose de promediar diferentes curvas históricas con el fin de estimar el comportamiento futuro de la utilización, hay otros aspectos que deben ser considerados.

Supóngase un grupo de curvas de duración de

caudales para un mismo mes pero de años diferentes como se in  
dica en el Gráfico 1.3. En ella se encuentra la posibilidad  
de promediar los valores que registran las diferentes curvas  
para un mismo día y conseguir una secuencia de valores dia -  
rios promediales para todo el mes. Procediendo así se obtie-  
ne la llamada curva de caudales "en paralelo", que tiene la  
característica de representar un valor medio de la "forma" o  
"tendencia" de las curvas de todos los años considerados, de  
modo que, la influencia de la abundancia o carencia de cauda-  
les que se hayan registrado en años anteriores se halla ate -  
nuada por los valores promedios.

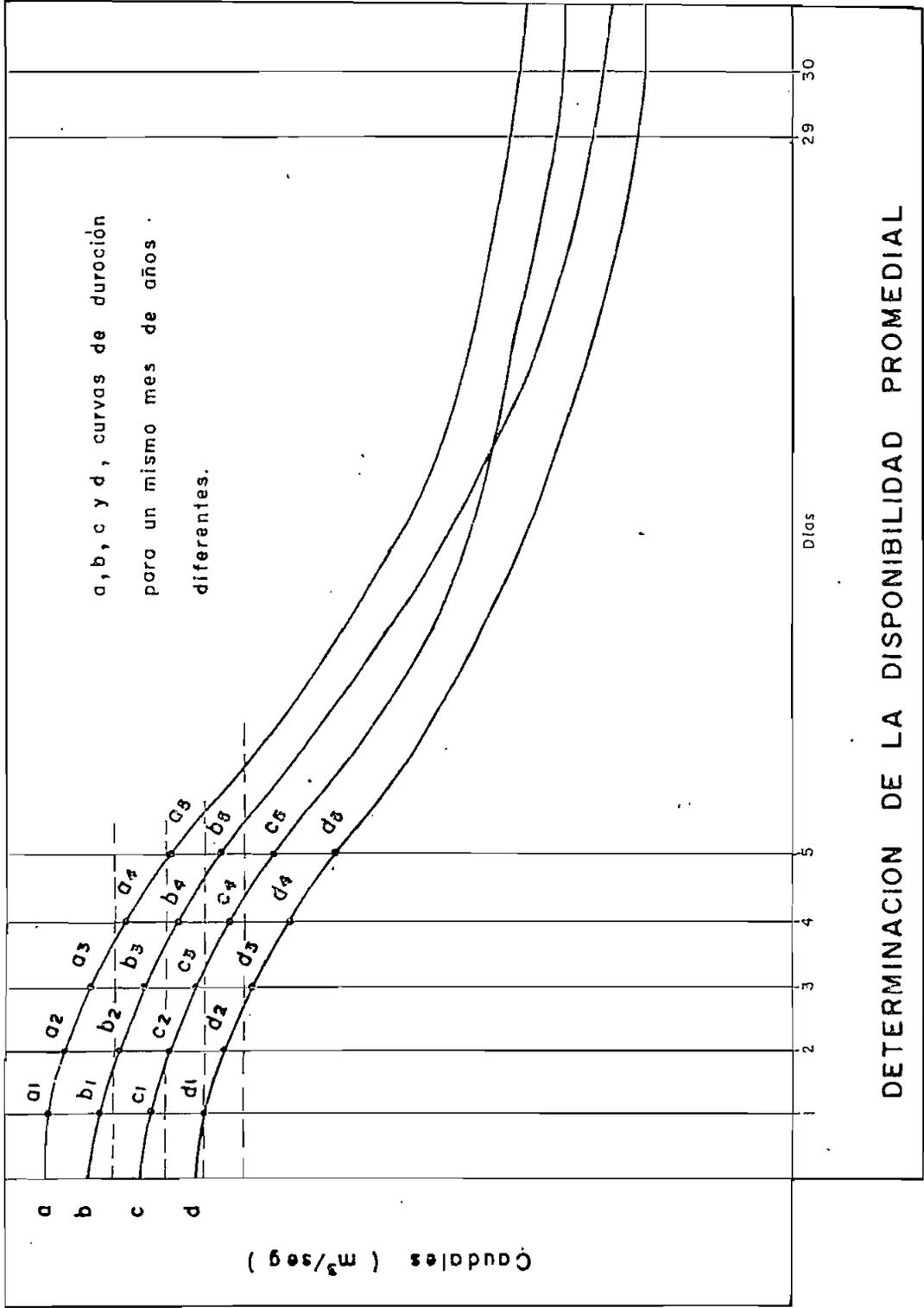
En el mismo gráfico anterior, y de acuerdo al  
procedimiento mencionado, los caudales diarios promediales se  
rían:

$$q_1 = (a_1 + b_1 + c_1 + d_1) / 4,$$

$$q_2 = (a_2 + b_2 + c_2 + d_2) / 4, \text{ etc.}$$

Otra forma de llegar a una curva de caudales  
equivalente consiste en promediar los grupos de valores más -  
altos (para el caso del ejemplo del gráfico, 4) e ir descen -  
diendo hasta llegar al grupo de valores más bajos, sin que im  
porte el año en que estos se hayan registrado. Los valores -  
promediales así obtenidos tendrán una secuencia descendente y  
podrán ser ploteados en una curva de duración llamada "en se-  
rie" que representa el "sumum" de las disponibilidades que han

Gráfico 1.3



ocurrido en todos los años del registro, tal que, la influencia de la abundancia o de la carencia de caudal tiende a ser sobreestimada, pues los caudales más altos, como los más bajos, están representados extensivamente.

Siempre con referencia al mismo gráfico, los caudales promediales según este segundo procedimiento serían:

$$q_1 = (a_1 + a_2 + a_3 + b_1) / 4,$$

$$q_2 = (b_2 + a_4 + b_3 + c_1) / 4,$$

$$q_3 = (a_5 + c_2 + b_4 + c_3) / 4, \text{ etc.}$$

Con una combinación adecuada de las curvas en serie y en paralelo, que representan características diferentes de la misma utilización hidráulica, se puede llegar a una interpretación más cercana a la realidad.

A pesar de que el cálculo se ha de realizar para los 30 días del mes, no todos los valores diarios de disponibilidad se aplican a la elaboración del programa. Como ya se dijo, se toman cinco períodos típicos que representan a grupos de días promediados en la siguiente forma:

Período a) Promedio de los valores medios entre curvas serie y paralelo, de los cinco días que registran valores más altos.

Período b) Promedio de los cinco días que registran valores más altos de la curva paralelo.

Período c: Promedio mensual .

Período d: Promedio de los cinco días que registran valores más bajos de la curva serie.

Período e: Promedio de los valores medios entre curvas serie y paralelo, de los cinco días que registran valores más bajos.

Caudal regulado: En el cálculo de la capacidad de regulación de las plantas que cuentan con depósito de compensación es deseable asegurarse del máximo límite de energía regulada que puede obtenerse, por encima de los valores promediales de disponibilidad, mediante la regulación de los caudales.

Ya se dijo que el remanente de caudal que causa la baja carga en la noche, menor que la carga promedial, es almacenado para ser usado en las horas de pico; siendo la energía así producida la llamada "energía regulada". (Ver Gráfico 1.4, figura 1).

Cuando las disponibilidades de caudal en los ríos sean tan altas como las necesidades para cubrir la potencia instalada de las plantas, de hecho no existirá potencia regulada. En cambio, si el caudal disponible toma el valor del caudal promedio, la regulación será la máxima que puede obtenerse con ese caudal. Por último, en el caso extremo de que se presentara un caudal inferior al promedio, no será posible efectuar una regulación por déficit de agua.

Gráfico 1.4

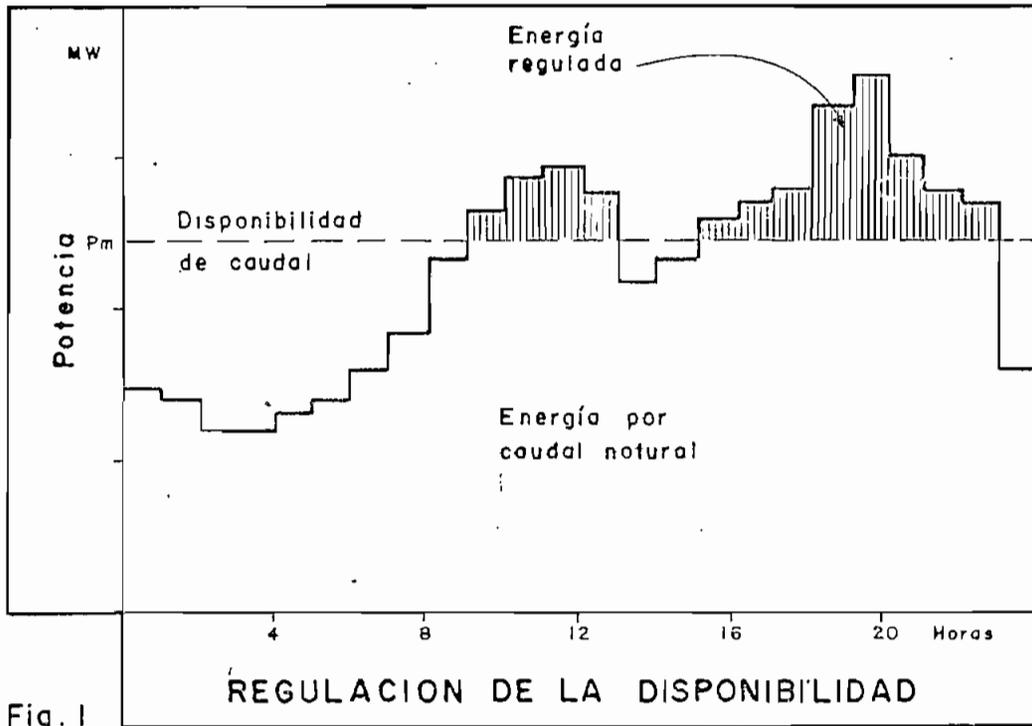


Fig. 1

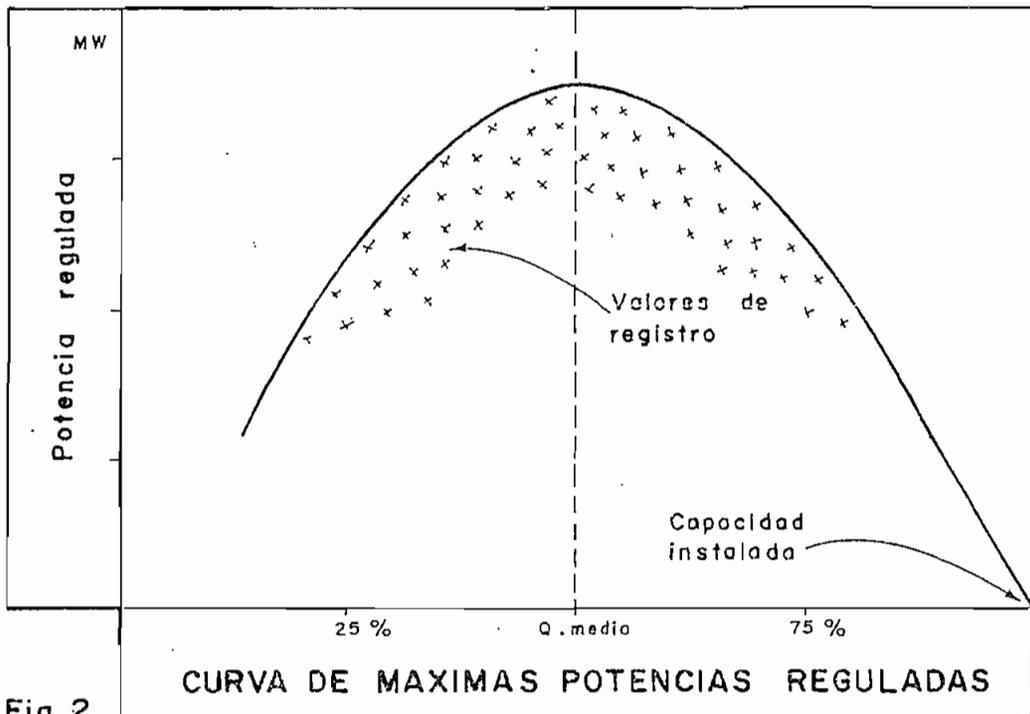


Fig. 2

En estos casos y en todas las situaciones intermedias que pueden presentarse lo deseable es obtener la máxima potencia regulada posible, acorde con las condiciones del caudal. La potencia regulada es igual a la diferencia entre la máxima potencia generada y la potencia promedial.

Como la potencia promedial varía con la curva de carga, aparece un factor de incertidumbre que solo puede ser obviado recurriendo a los datos históricos de potencias reguladas en periodos anteriores con relación a las disponibilidades de caudal. Registrando en forma gráfica estos valores puede determinarse el límite máximo de potencia regulada que ha de conseguirse con una determinada disponibilidad de caudal; cual es la premisa del cálculo de la capacidad de regulación. (Gráfico 1.4, figura 2)

Suspensiones de la operación: Existe otro elemento que debe tenerse en cuenta al buscar la expresión de la disponibilidad. Se trata del factor de reducción debido a suspensiones por emergencia o mantenimiento de las plantas. Sin embargo, lo que para una sola planta puede ser difícil de determinarlo, para un sistema completo puede tener significación el resultado que arroje el estudio de los registros de operación de las plantas, y en muchos casos puede llegarse a factores de reducción con valores de hasta 5 % en promedio diario.

Quedan las plantas con reservorio para almacenamiento por bombeo, cuyos sistemas de operación pueden ser:

- a) Bombeo para cubrir déficits
- b) Bombeo por razones económicas

El primer sistema se emplea en casos en que la disponibilidad de suministro de las plantas convencionales, hidráulicas o térmicas, no es suficiente para cubrir la carga máxima diaria. El segundo sistema se usa con el propósito de suspender la operación de las centrales térmicas de bajo rendimiento, generando durante el día con agua almacenada en la noche a base de la energía en exceso del sistema proveniente de plantas térmicas de mayor rendimiento. En este último caso la economía de la operación debe justificarse plenamente.

(Ver Anexo 1.2)

#### 1.7. Capacidad termoeléctrica

En tratándose de un sistema en que el suministro se hace combinando las capacidades hidráulicas y térmicas, como por ejemplo en el caso de Quito, la disponibilidad de generación termoeléctrica puede tener mucha importancia en el abastecimiento durante los períodos de estiaje o como refuerzo de la disponibilidad de generación hidroeléctrica para suplir los picos diarios.

La máxima disponibilidad de potencia que puede obtenerse de las instalaciones termoeléctricas está condicionada fundamentalmente a las reparaciones y operaciones de mantenimiento que deben hacerse periódicamente en las plantas.

La época del año en que se ejecutan y el tiempo que toman —

tienen decisiva influencia en el programa de suministro de la demanda, por lo que se hace indispensable la elaboración de programas de mantenimiento para cada planta. Combinando tales - programas se llega a un programa general para el conjunto de plantas existentes.

A base de este programa general puede definirse la disponibilidad neta anual del sistema en su parte de facilidades termoeléctricas del siguiente modo:

Disponibilidad neta = Capacidad de generación - disminución de disponibilidad debida al programa de mantenimiento.

(Ejemplo de programa de mantenimiento en Anexo 1.3.)

La época generalmente escogida para las reparaciones de las instalaciones termoeléctricas es la de invierno o lluvias abundantes, que es cuando existe la mayor disponibilidad hidroeléctrica. Además, las plantas térmicas sufren con más frecuencia que las hidráulicas interrupciones debido a mal funcionamiento o fallas. Esto determina la intervención de otro factor que es el de paralización y que representa la disminución de la disponibilidad por este concepto. Tal factor puede ser obtenido solamente a base de estadísticas de operación de años pasados y se ha podido comprobar que es más alto en la noche que en el día, pues las fallas que no exigen una salida inmediata de la central durante el día son dejadas para ser

reparadas en la noche.

#### 1.8. Balance de demanda y suministro

Habiendo establecido 5 períodos de carga diferenciados para la curva de carga de un día ordinario de un mes determinado (Gráfico 1.1.), y habiendo definido igualmente 5 períodos de diferente afluencia en la curva de duración de caudales para el mismo mes, la que en último término representa duración de las disponibilidades hidroeléctricas (Gráfico 1.2, figura 2), el balance entre demanda y disponibilidad hidroeléctrica puede determinarse con mucha aproximación comparando los 5 períodos de demanda con cada uno de los 5 períodos de días representativos del caudal o de las disponibilidades. Por lo tanto, con 25 operaciones de cálculo se tiene el programa de suministro de potencia hidroeléctrica mensual. El programa de operación de las plantas termoeléctricas no viene a ser sino un complemento de éste y consiste en llenar los déficits de la curva de carga de acuerdo a las disponibilidades determinadas de antemano.

La disponibilidad de las plantas con regulación por reservorios o depósitos de compensación se ajustará de tal modo de hacer la operación de las plantas térmicas lo más eficiente posible y de mantener el margen de reserva de disponibilidad lo más uniformemente, a fin de encarar las emergencias producidas por paralización de generadores o cambios bruscos de caudal y carga no previstos, sin riesgo de suspensiones del servicio.

De las reservas mencionadas puede disponerse la energía para bombeo de las estaciones que deban trabajar - de ese modo, de acuerdo al programa establecido. Debe entenderse desde luego que la reserva corresponderá a las plantas térmicas después de obviar las condiciones propias de arranque y de funcionamiento por periodos cortos mediante la adopción de medidas adecuadas. Se entiende también que puede haber ocasiones, especialmente en la temporada de lluvias, en que la reserva sea hidroeléctrica.

ANEXO 1.1.

Determinación de los requerimientos de energía para un día ordinario. Ejemplo de cálculo.

- Se asume que los requerimientos de energía estimados para un mes determinado son de 29.000 MWH
- Si este mes tiene 30 días y el número de días de fiesta y domingos es de 5, el número equivalente de días ordinarios en el mes será:

$$30 - 5 + (0,8 \times 5) = 29$$

- 0,8 significa que la energía necesaria para los días de fiesta y domingos es el 80 % de la de los días ordinarios. (Valor asumido)
- La energía para un día ordinario será:

$$29.000 \text{ MWH} / 29 \text{ días} = 1.000 \text{ MWH} / \text{ día}$$

- Esta energía estimada para un día ordinario de un mes determinado se reparte a lo largo de las 24 horas del día, de acuerdo a los valores de potencia que ha de tomar la curva de carga en ese día.

ANEXO 1.2.

Eficiencia en la operación de bombeo.

La relación entre la energía eléctrica producida por el agua almacenada mediante bombeo y la energía usada para bombear la misma agua se conoce como eficiencia en la operación de bombeo. Esta varía lógicamente con la altura del agua.

Desde el punto de vista económico, no hay mérito en la operación a menos que la eficiencia de la planta térmica que se va a suspender en el día sea mayor que el producto de la eficiencia en la operación de bombeo por la eficiencia de la planta térmica que alimenta dicha operación.

Ejemplo de cálculo.

- Eficiencia de una central térmica obsoleta: 30 %
- Eficiencia en la operación de bombeo: 77 %
- Eficiencia de una central térmica nueva: 40 %

$$0,77 \times 0,4 = 0,308$$

Es una operación económica, pues,

30,0 % es menor que 30,8 %

Anexo 1.3

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PARA EL GRUPO DE PLANTAS TERMICAS													
	Capacidad instalada	Tiempo de mantenimiento mensual											
Planta A	10 MW				30 días								
Planta B	15 MW					30 días							
Planta C	25 MW										30 días	15 días	
Disponibilidad térmica total		50 MW	50 MW	50 MW	40 MW	35 MW	50 MW	50 MW	50 MW	50 MW	25 MW	25 + 25 / 2	50 MW
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D

## CAPITULO II INVESTIGACION DE LA CUENCA HIDROGRAFICA

### 2.1. Introducción

La investigación exhaustiva de una cuenca hidrográfica constituye el paso primordial e inevitable para llevar adelante el planeamiento de una utilización hidroeléctrica y tener éxito en las etapas de diseño, construcción y aún de operación. Dicha investigación puede orientarse en forma adecuada si con anterioridad se han considerado extensivamente las posibilidades del futuro proyecto, para dar paso a los estudios preliminares y de factibilidad, en ese orden.

Los estudios preliminares se llevan a cabo con el fin de hacer reportes cuyas finalidades son las siguientes, aparte de que sirven para la divulgación y aceptación del proyecto por parte de la empresa interesada, autoridades relacionadas del gobierno, instituciones crediticias, etc:

- a) Evaluación del proyecto
- b) Obtención de fondos para estudios

Los reportes de esta etapa son usados además para la ejecución de planes de desarrollo hidroeléctrico a largo plazo.

En nuestro país, los estudios para el desarrollo de los recursos hidráulicos han sido llevados a cabo por

diferentes organismos estatales y por algunas empresas eléctricas interesadas en el desarrollo de proyectos en sus propias áreas de influencia, sin que aparentemente haya existido una política centralizadora al respecto. Recién desde la promulgación de la Ley de Electrificación y con la creación del Instituto Ecuatoriano de Electrificación, se ha encargado éste de estudiar varios proyectos de alcance nacional y de impartir directrices para el desarrollo de proyectos locales.

Así las cosas, al concebir un proyecto y emprender en los estudios preliminares, se deben hacer las primeras evaluaciones del potencial hidráulico, iniciar o sistematizar estudios hidrológicos, hacer evaluaciones geofísicas, o replantear los mapas, comenzando por reconocer la zona del proyecto. Solo cuando se hayan obtenido resultados satisfactorios de estos estudios se puede dar el siguiente paso hacia los estudios de factibilidad. Estos se llevan a cabo para hacer evaluaciones finales geofísicas y económicas y determinar la factibilidad de construcción del proyecto. Los resultados sirven de información para los siguientes fines, y así como en el caso anterior, para la elaboración de planes de desarrollo hidroeléctrico a largo plazo:

- a) Consecución de fondos
- b) Conseguir aprobación del proyecto por parte de las entidades que tienen relación con el mismo.
- c) Coordinación entre las empresas interesadas en el proyecto.

Tales aprobación y coordinación se refieren a los casos de proyectos de uso múltiple en que tengan que ver las autoridades que controlan la utilización del agua o planifican la agricultura, o de proyectos de alcance zonal que a - fectan a varias provincias.

El resultado de los estudios se utiliza ade - más para preparar y especificar la convocatoria a ofertas de los estudios definitivos, sirviendo posteriormente para la e - jecución de los propios estudios definitivos.

En nuestro medio, la práctica común es la de encargar estos estudios a firmas consultoras extranjeras o nacionales, lo que se justifica por el grado de especialización que esta etapa demanda, o por exigencias de las entidades proveedoras de fondos para el proyecto.

A continuación se detallan los aspectos sobre salientes de los estudios que comprenden la investigación de la cuenca.

## 2.2. Selección del sitio del proyecto. (Planeamiento preliminar)

La primera estimación del potencial energéti - co disponible para generación hidroeléctrica, así como de las utilidades complementarias que pueden hacerse de un deter - minado recurso hidráulico, se hacen a base de cartas geográficas o mapas generales que pueden tener escalas de 1/25.000 o

de 1/50.000 y que son comunmente editados por algún organismo de gobierno. Estos hacen posible estudiar e interpretar las corrientes de los ríos, estimar la caída disponible, ubicar - tentativamente reservorios y apreciar su capacidad de reserva, localizar canales, tuberías, etc; todo en primera aproximación pero que confiere una idéa básica de las características del proyecto.

Si además se cuenta con información relativa a la descarga del curso en estudio, para lo cual han de usarse los registros de las estaciones hidrológicas que mantiene las instituciones de gobierno especializadas u otras entidades interesadas en su utilización, pueden evaluarse primariamente las posibilidades del proyecto.

La determinación de la conveniencia o inconveniencia del sitio propuesto para el proyecto será posible solamente cuando se emprendan los estudios preliminares, también llamados estudios cartográficos por estar basados fundamentalmente en el análisis y uso de cartas geográficas, los mismos que deben responder a un plan coordinado y lógico de manera que exista la necesaria concatenación, etapa tras etapa, y al mismo tiempo tengan en consideración los diferentes factores externos que pueden influir en su concepción original.

Así, una vez definida la caída existente entre un punto de la cuenca hidrográfica y otro aguas abajo, será  necesario pensar en la existencia de futuros embalses, estanques

de regulación, etc, que pueden tener relación con otras plantas existentes, instalaciones particulares, poblados, areas de cultivo, etc, de manera de evitar interferencias que pudieran ser mutuamente perjudiciales.

El planeamiento preliminar llevado de una forma minuciosa brindará la oportunidad de relacionar los factos inherentes a la concepción misma del proyecto con los factores externos debidos a su localización, lo cual dará como resultado una ratificación, o determinará la necesidad de cambios en el sitio del proyecto seleccionado.

Los pasos a seguirse y que comprenden el planeamiento preliminar son los siguientes:

a) Estudio de la pendiente del río, posibilidad de ubicación de reservorios y presas, ruta y longitud de las vías de agua, caída disponible, etc. Estos estudios se hacen sobre planos o mapas generales de la zona (Esc 1/25.000) en los que se determina la localización tentativa de las obras componentes de la utilización.

b) Medida del area de captación de la cuenca y del escurrimiento del río, estimación de la capacidad y del area de la superficie del reservorio, niveles de agua de la toma y la descarga, etc.

c) Conversión de los datos de afluencia obtenidos en las estaciones de aforo en valores de escurrimiento en el sitio del proyecto y programación de la información obteni-

da para sacar las curvas de duración de la descarga, volúmenes acumulados y valores promediales de los caudales.

d) Estudio de las reglas de operación del reservorio y asignación de responsabilidades en la operación del sistema (carga de base, carga de pico, carga en la estación de estiaje, etc), a fin de determinar la máxima descarga de la central. Este estudio tiene como base los datos de caudal firme, caudal medio anual, curva de duración y curva de volúmenes obtenidos anteriormente.

e) Cálculo de la descarga efectiva diaria y mensual y del promedio de descarga anual para generación eléctrica, usando la correlación existente entre la descarga máxima y <sup>el</sup> escurrimiento.

f) Cálculo de la potencia máxima (MW) y de la energía (MWH) disponible anualmente, utilizando los datos de descarga calculados antes.

g) Estimación del costo aproximado de construcción del proyecto global y de la parte correspondiente a la capacidad instalada de la planta.

### 2.3. Estudios hidrológicos

Descarga. Las características de descarga de un río deben ser observadas durante un tiempo suficientemente largo, tal que permita tener un conocimiento certero de su comportamiento en

las diferentes épocas del año, y de cuales pueden ser los límites de cambio de cada condición en diferentes años. Al respecto, cabe anotar que los principales ríos del país han venido siendo estudiados por un período de alrededor de 25 años por el Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología, lo cual permite contar con información apropiada para evaluar los cursos del agua, e inclusive conocer variaciones extremas como son los "ciclajes" de los ríos que en muchos casos pueden ser determinantes del éxito o fracaso de un proyecto, para lo cual basta recordar el ejemplo clásico en nuestro medio de las crecientes del río Chanchán.

Para evaluar dicho comportamiento se determinan las siguientes descargas características, teniendo como base la curva de duración de los caudales: (Gráfico 2.1, figura 1)

- a) Descarga de sequía. Es la descarga que ocurre durante 355 días en el año.
- b) Descarga baja. Es la que ocurre durante 275 días en el año.
- c) Descarga ordinaria. Es la que ocurre durante 185 días en el año.
- d) Descarga de 95 días.
- e) Descarga de crecienta. Es la máxima descarga del año.

Medición de la descarga. Si bien la medición de los caudales de un curso de agua puede hacerse en forma directa, los méto-

Gráfico 2.1

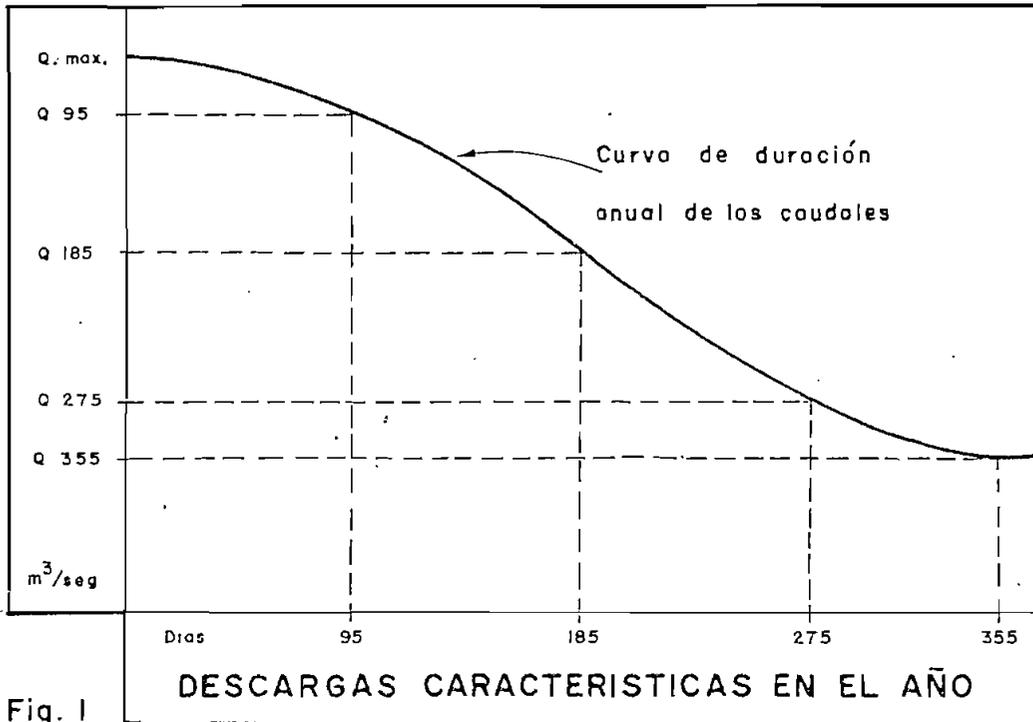


Fig. 1

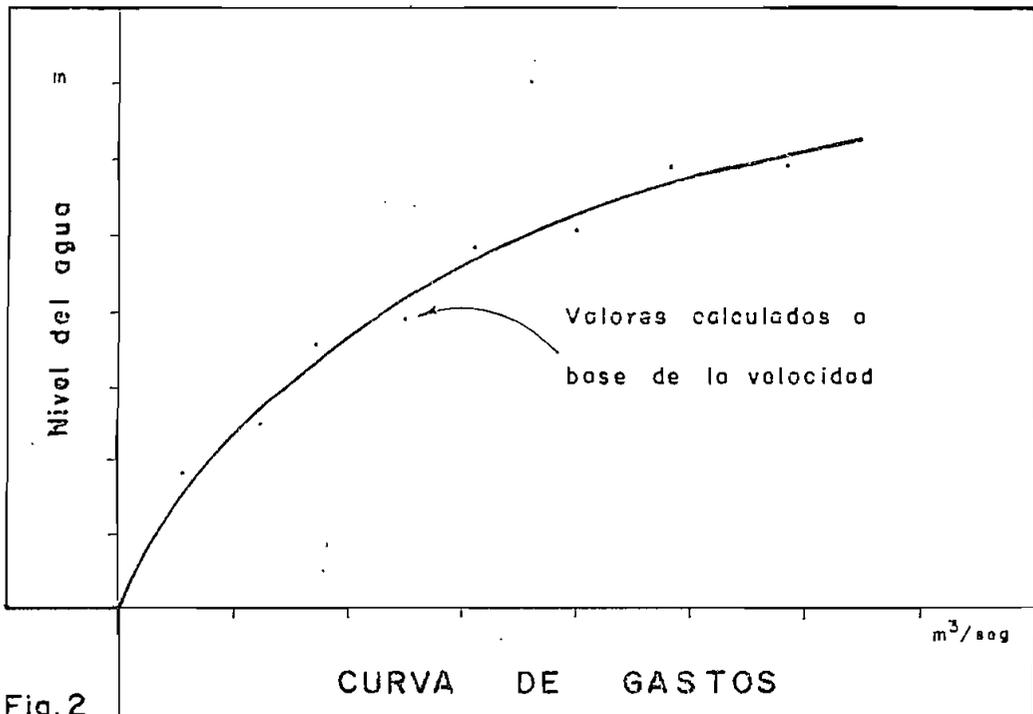


Fig. 2

dos utilizados son de aplicación complicada y muchas veces de poca precisión. La práctica más extendida es deducir los caudales mediante la utilización de sistemas auxiliares que simplifican el procedimiento.

Las estaciones de aforo colocadas en sitios cercanos a la zona del proyecto, o que han sido instaladas - con el objetivo de evaluar el río y su cuenca para un proyecto definido, son las encargadas de llevar a cabo las siguientes mediciones básicas.

- a) Nivel del agua
- b) Sección transversal del río en el sitio de la estación
- c) Velocidad del agua
- d) Gradiente de la superficie del agua

Como regla general, la descarga se extrae por medio de cálculo a base de estas mediciones elementales, utilizando cualquiera de los métodos conocidos. La velocidad se mide con los llamados medidores de corriente.

Dependiendo de las características de las estaciones de aforo, y especialmente en las temporadas de lluvias, es usual la utilización de boyas para medir solamente el nivel del agua y calcular la descarga mediante fórmulas o usando la llamada "curva de gastos". (Gráfico 2.1, figura 2)

Para confeccionar esta curva deben medirse -

las velocidades de la sección transversal de la estación de aforo para diferentes alturas del nivel de agua. A base de estas velocidades se calculan los respectivos caudales y se dibuja la curva que sirve para futuras observaciones.

La descarga en función del nivel corresponde a una ecuación cuadrática de la forma:

$$Q = a + bh + ch^2,$$

y cuyos coeficientes tienen en parte relación con la forma del lecho del río, por lo que a veces se vuelve necesario hacer modificaciones periódicas de acuerdo a como varía el cauce para obtener resultados correctos todo el año.

Los sitios escogidos para estaciones de aforo deben reunir ciertas condiciones que los permitan proporcionar los datos con la exactitud mínima necesaria para ser confiables. Estas condiciones deben ser, sin estar limitadas, a las siguientes:

- a) Velocidad del agua entre 0,5 y 2,0 m/s
- b) Reducido movimiento de la vena central
- c) Reducido movimiento de la vena del lecho
- d) Ausencia de contracorrientes
- e) Ninguna influencia de aguas abajo como las que causan los diques o desembocaduras cercanos.

Ordenamiento de los registros hidrológicos. En las estaciones

de aforo se obtiene alguna información directamente, pero la mayoría de los datos tienen que ser ordenados y procesados para llegar a una información hidrométrica completa. La información necesaria para la evaluación de una cuenca que debe obtenerse de las estaciones de aforo es la siguiente:

- a) Secciones transversales del sitio de medición de nivel.
- b) Curva de gastos
- c) Tabla de descargas con relación a los niveles. (Consecuencia de la curva anterior)
- d) Tabla de descarga anual con relación a los niveles.
- e) Tabla de descarga anual.
- f) Hidrograma. (Diagrama cronológico de caudales)
- g) Tabla de duración de la descarga.
- h) Curva de duración de la descarga.
- i) Tabla de valores máximos de descarga.

#### 2.4. Estudios meteorológicos

Las observaciones meteorológicas en nuestro medio están siendo llevadas a cabo casi exclusivamente por la entidad gubernamental encargada. Ella puede suministrar la información necesaria para emprender en los estudios de los proyectos importantes. Sin embargo, puede ser necesario hacer observaciones suplementarias durante el tiempo que duren los estudios, pues éstas han de fortalecer los datos históricos existentes. Actualmente es posible hacer observaciones -

meteorológicas en las áreas montañosas por medio de estaciones automáticas o "robots" que transmiten la información a los centros de recolección de datos en forma inmediata. Tales datos servirán para el pronóstico de las condiciones difíciles - que pueda tener la instalación, para el diseño y para el planeamiento mismo del proyecto, como se puede ver en el análisis del anexo 2.1.

## 2.5. Reconocimiento y estudios de campo

Una vez que los estudios preliminares se han completado, éstos se verifican por medio de un reconocimiento en el terreno. Se reconocen los sitios para el dique, el reservorio y la planta; las rutas de las vías de carga y descarga; los niveles máximos afectados por las crecientes y las condiciones topográficas y geológicas del sitio.

Una labor muy importante del equipo de reconocimiento es la comprobación de la situación presente en cuanto a la utilización del agua del río en cuestión. Esto se refiere a intereses y derechos particulares que con sujeción a las leyes de uso de las aguas pudieran haber, y de las compensaciones u obras adicionales que pudieran ser necesarias - para respetar esos derechos, lo cual incidiría en el costo del proyecto o en su concepción.

Otra labor es la de preocuparse de las disponibilidades de materiales agregados para la fabricación de hor

migón, así como de las facilidades de transporte de materiales y equipos para el período de construcción.

Levantamiento topográfico. Dentro de los estudios de campo el levantamiento topográfico es el trabajo inicial y el que sirve de base para los estudios definitivos. En él se pueden distinguir:

a) Nivelación longitudinal del río. Esta sirve para determinar la caída disponible en el sitio del proyecto. La forma correcta de llevar este trabajo es aquella que determine un error menor a 1,0 cm de elevación por 1,0 Km de longitud. Además, se considera importante para la prosecución de los trabajos posteriores y el replanteo del diseño, la implantación de mojones cada 2 ó 3 kilómetros o en puntos claves como puede ser la conjunción de dos ríos.

b) Triangulación y levantamiento estadimétrico. En base al mojonamiento de nivelación se hacen estos estudios topográficos que sirven para el planeamiento y diseños definitivos.

Los planos topográficos se dibujan en diferentes escalas de acuerdo al uso que se los va a dar. Estos pueden ser:

- Plan general, escalas 1/50.000 y 1/5.000
- Reservorio, vías de agua y construcción, escalas 1/10.000,

1/5.000 y 1/1.000

- Dique y central, escalas 1/500 y 1/200

Las escalas indicadas son las comunmente usadas. Escoger una de ellas dependerá del objetivo del dibujo; por ejemplo, los planos de detalles constructivos serán los de escala que implique la menor reducción; las vistas generales por el contrario podrán tener escalas de mayor relación. El distanciamiento entre curvas de nivel está determinado también de acuerdo al uso de los planos y a su escala. Se acepta 5 a 10 mts de contorno para planos con escala de 1/5.000, y 2 a 5 mts para planos con escalas 1/1.000 y 1/500.

Estudios geológicos. Los estudios geológicos se llevan a cabo en la superficie y en el subsuelo. Los primeros, que son llevados por geólogos especialistas, sirven para observar los orígenes topográficos, el lecho del río, exposición de las rocas, taludes, terrazas, etc. Se evalúa desde el punto de vista geológico la factibilidad de las obras civiles importantes y se sacan además conclusiones que servirán para adoptar métodos de estudio del subsuelo. El estudio del subsuelo contribuye a aclarar cualquier factor desconocido que pudo haber quedado en las investigaciones de la superficie.

Dependiendo de las características del proyecto, se hacen investigaciones sísmicas y sondeos por medio de picaduras en las rocas, zanjas o perforaciones. Las investigaciones sísmicas tienen el objeto de detectar los materiales sedimentarios, comprobar la calidad y cantidad de los materia

les agregados y la arcilla y determinar la distribución de los taludes diestríticos. Los sondeos se usan para examinar la distribución de las rocas y la arcilla y descubrir los defectos geológicos como fallas, rajaduras, etc. Se practican fozos horizontales y verticales para medir la permeabilidad de las rocas y su módulo de elasticidad. En muchos casos este tipo de estudios se dificulta por los inconvenientes que puede presentar el sitio para el acceso de maquinaria apropiada.

Se debe tener en cuenta que los estudios geológicos constituyen la parte más cara de los estudios de campo, pero se justifican pues, de éstos depende que no exista encarecimiento de los costos de construcción o modificaciones en los diseños cuando esté avanzada la obra, si han sido adecuadamente conducidos. A tal punto es importante contar con precisas consideraciones geológicas antes del diseño, que se conceptúan apropiados los gastos de porcentajes tan altos como el 5 % de los costos de construcción en los estudios de investigación geológica.

ANEXO 2.1.

Utilización de las observaciones meteorológicas

Tipo de observación

- Utilización

Variación de la temperatura ambiente

- Determinar las condiciones de vida en el sitio del proyecto.
- Planificación de las instalaciones provisionales para el período de construcción
- Calcular los esfuerzos en la tubería de presión
- Enfriamiento y curado del hormigón
- Preparación de los programas de construcción

Temperatura y calidad del agua

- Planificar el suministro de agua a la construcción
- Planificar el servicio de agua a la estación
- Enfriamiento del hormigón
- Protección de las estructuras contra la erosión

Distribución de las precipitaciones

- Condiciones para el diseño y construcción de las estructuras civiles
- Cálculo del coeficiente de escurrimiento
- Cálculo de las crecientes.

Evaporación

- Pérdidas en la superficie del reservorio

Presión atmosférica

- Diseño de la maquinaria
- Cálculo de la altura de aspiración entre la turbina y la descarga, en caso de turbinas Francis y de Propulsor.

Dirección y presión del viento

- Diseño de las estructuras de Ing. Civil
- Diseño de estructuras metálicas y líneas de transmisión.

Humedad

- Diseño del equipo de ventilación para las salas de equipos eléctricos y generadores.

## CAPITULO III ELABORACIONES HIDROLOGICAS

### 3.1. Introducción

El racional aprovechamiento de un curso de agua, el mismo que de acuerdo a las tendencias modernas se hace con propósitos generalmente múltiples, como son los de producción de energía eléctrica, uso doméstico e industrial de las aguas, regadío y control de crecientes, depende en gran manera de la correcta interpretación que se de a los datos y registros históricos del curso en cuestión.

Existen muchos fenómenos naturales, especialmente meteorológicos, que influyen en las cuencas fluviales y determinan variaciones imprecisas de los caudales y los escurremientos. Ante esta realidad incontrolable ha surgido la necesidad de emplear ciertos métodos de interpretación de los fenómenos hidrológicos en forma gráfica con el fin de llegar a una utilización racional del curso de agua, obviando las incertidumbres que plantean muchas veces las interpretaciones matemáticas. Estos métodos son los conocidos como elaboraciones hidrológicas.

### 3.2. Registros hidrológicos

El elemento básico para todas las elaboraciones hidrológicas es el registro preciso de los caudales del

río que se proyecta utilizar. Si los registros obtenidos en un año determinado, o los valores normales correspondientes a un ciclo de variación de lluvias, se llevan a una gráfica coordenada de caudales contra tiempo en días o meses, se obtiene el diagrama cronológico de caudales registrados en ese año, o promediales de ese período, como lo muestra el gráfico 3.1, figura 1.

El volumen total de agua o escurrimiento que ha pasado por la estación de aforo en el período de 12 meses, correspondiente al año hidrológico que se muestra en dicha figura, está dado por el area total encerrada por la curva del diagrama cronológico. Para un período menor, el escurrimiento correspondirá al area parcialmente encerrada por la curva en el tiempo que dure ese período. Así, sumando los escurrimientos que cronológicamente se han ido sucediendo, y trasla dando esos valores a un par de ejes coordenados, se tiene el diagrama integral de caudales, curva de escurrimientos o curva de volúmenes acumulados, cuyas ordenadas representan los volúmenes que han pasado por un punto determinado del cauce, que puede ser la estación de aforo, en el tiempo determinado por las abscisas. El caudal en un momento cualquiera estará dado por la pendiente de la tangente a la curva en ese punto. Además, el escurrimiento total dado por la mayor ordenada, dividido para el año expresado en segundos, determina el caudal medio anual del curso.

Gráfico 3.1

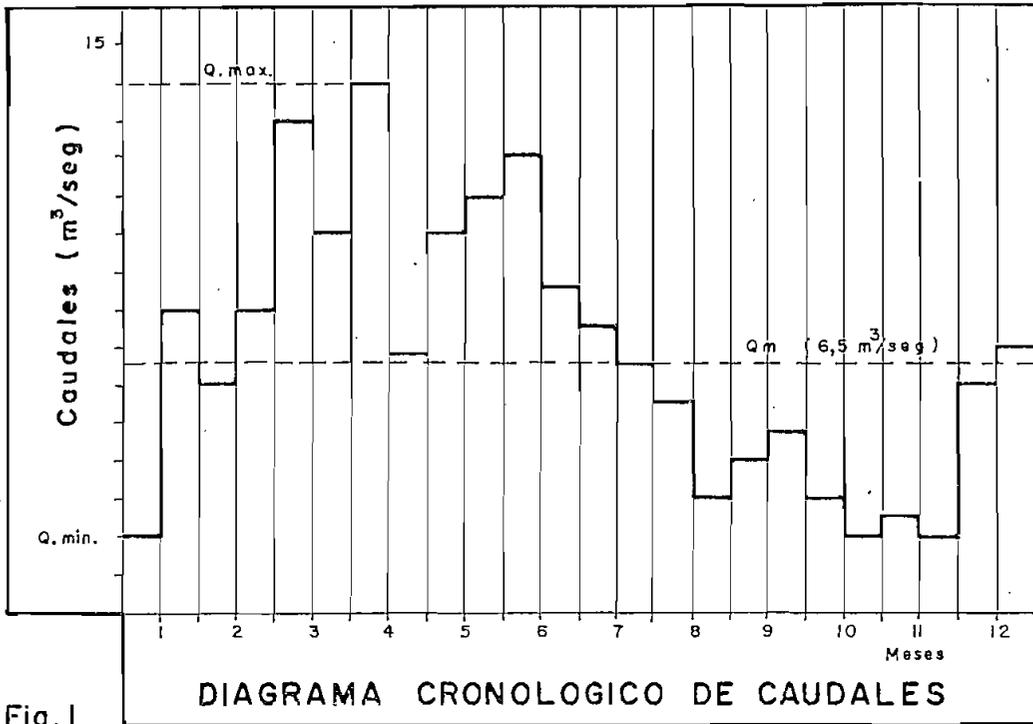


Fig. 1

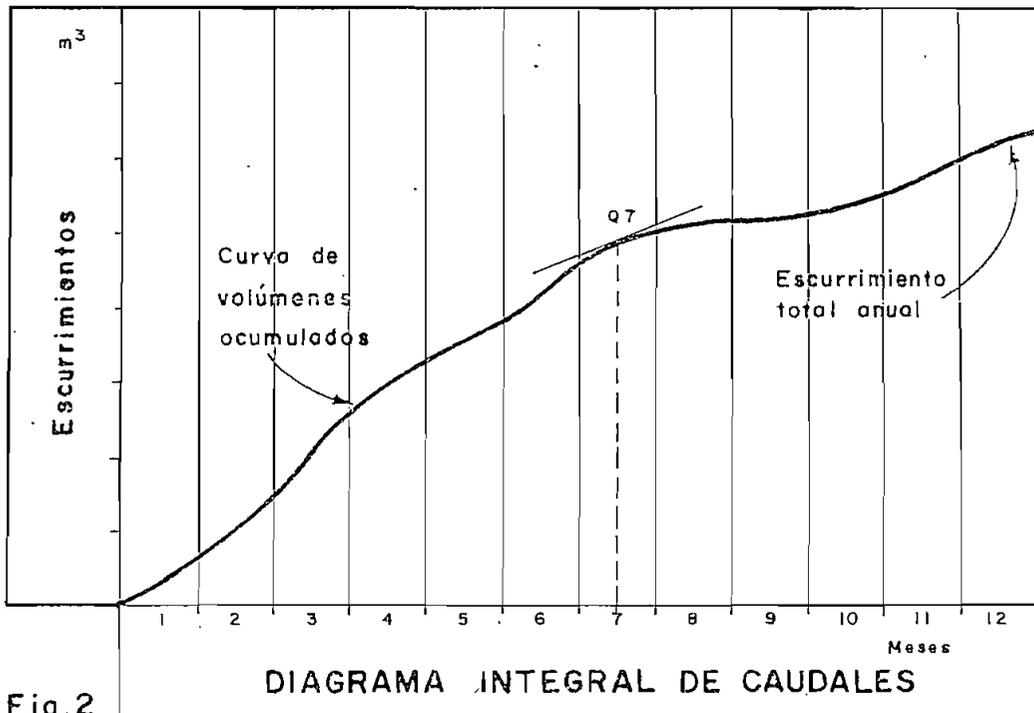


Fig. 2

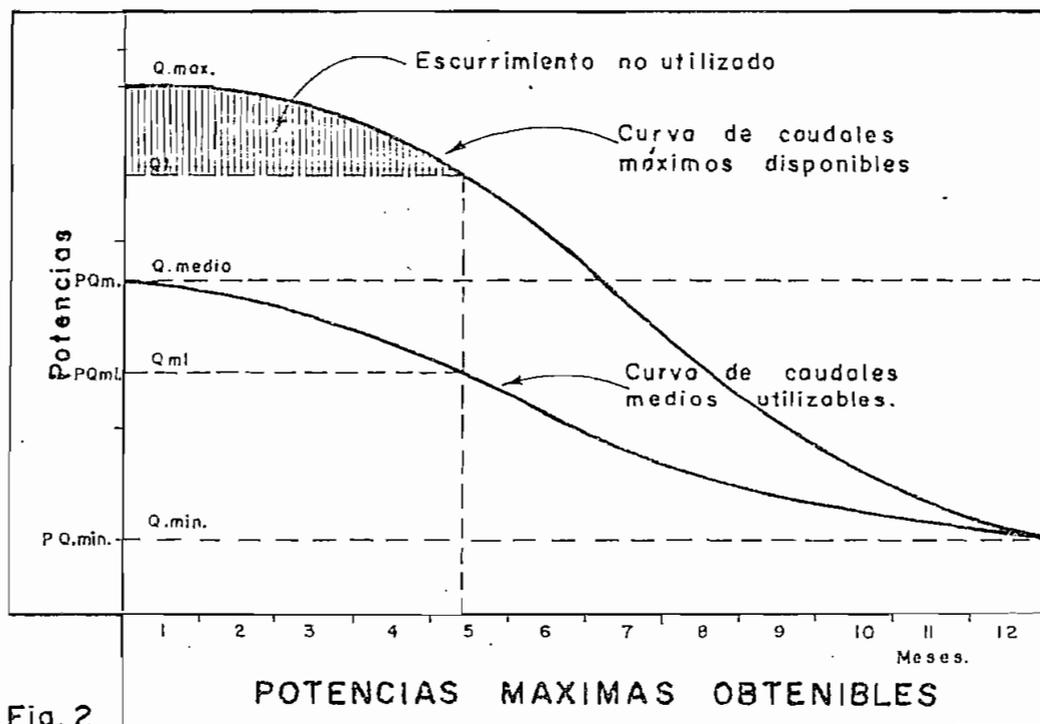
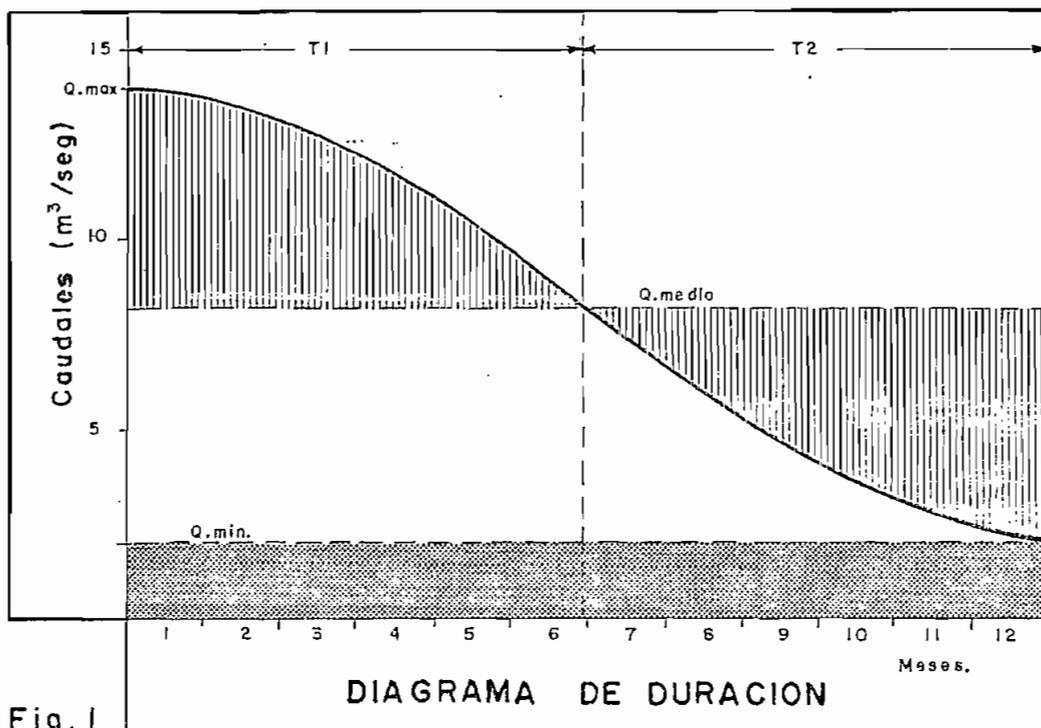
El diagrama integral de caudales llamado también curva de masas que puede verse en el gráfico 3.1, figura 2, es una de las más importantes herramientas en la evaluación de los cursos de agua.

También a base del diagrama cronológico de caudales se obtiene el diagrama de duración que es igualmente importante para la definición de la utilización que se va a dar al curso fluvial. En él constan los tiempos acumulados que dura un cierto caudal independientemente de las fechas en que se haya presentado. El caudal mínimo durará los 365 días del año, en tanto que el caudal máximo podrá durar tan solo un día, según puede verse en el gráfico 3.2, figura 1.

Puesto que las ordenadas de la curva de duración representan caudales como en el diagrama cronológico, el área encerrada por la curva representa el escurrimiento total anual del cauce, y por tanto, la recta del caudal medio anual ( $Q_m$ ) es la recta de compensación, que significa que el escurrimiento producido por caudales mayores a  $Q_m$  durante el tiempo  $T_1$  es igual al defecto que producen caudales menores a  $Q_m$  en el tiempo  $T_2$ .

Viéndolo así, la posibilidad que presentaría el curso para su utilización más eficiente sería la de construir una central que trabaje con el caudal  $Q_m$ , la misma que operaría el tiempo  $T_2$  con el exceso de agua de  $T_1$ , a base de

Gráfico 3.2



un embalse de acumulación de caudales. Esto quiere decir que si se desea que esta utilización trabaje a plena carga y a un caudal  $Q$  cualquiera durante todo el año, necesariamente este caudal  $Q$  debe ser menor, o a lo más igual, que el caudal  $Q_m$ ; a más, claro está, de la regulación artificial correspondiente.

Si la central está diseñada para uno de los - caudales extremos, máximo o mínimo, se habrá conseguido una instalación que trabaje a plena carga y sin regulación todo el año en el caso de mínimo, o en el caso de máximo una instalación que aproveche la máxima potencia por muy corto tiempo y que todo el resto del año trabaje a baja potencia. Es decir, hablando en términos de utilización "racional" del curso, la máxima potencia obtenible de él durante todo el año es la co-respondiente al caudal medio  $Q_m$ ; la cual se obtendrá con re-gulación artificial de todo el escurrimiento anual. En el o-tro lado, sin regulación, la máxima potencia obtenible duran-te todo el año es la correspondiente al caudal mínimo ( $Q_{min}$ ); y en este caso se habrá utilizado solo parcialmente el escu-rrimiento anual, en la proporción en que el caudal mínimo participa del resto de caudales. Este escurrimiento se halla -representado por el area inferior rayada del gráfico menciona-do. Entre estos <sup>dos</sup> valores existe un sinnúmero de posibilidades de utilizar el curso de agua mediante regulaciones parciales, lo que da igualmente diferentes valores de potencia firme ob-tenible del mismo.

### 3.3. Características hidrológicas

La posibilidad de que se hablaba de obtener diferentes valores de potencia firme durante todo el año, según se usen diferentes volúmenes parciales del escurrimiento total del curso de agua, tiene relación directa con los caudales medios correspondientes a esos volúmenes de escurrimiento usados. La gráfica de todas esas posibilidades de obtención de potencia firme se conoce como la curva de caudales medios utilizables o de potencias máximas obtenibles y tiene una relación de dependencia con la curva de duración también conocida como curva de caudales máximos disponibles.

En el gráfico 3.2, figura 2 se puede visualizar lo dicho con respecto a la utilización de un volumen parcial del escurrimiento total. Supóngase la utilización de los volúmenes debidos a los caudales menores a  $Q_1$ . El valor de la máxima potencia firme obtenible con ese escurrimiento es  $P_{Q_1}$ , correspondiente al caudal medio ( $Q_m$ ) del volumen parcial utilizado (area total menos area superior rayada del gráfico).

Si se usara el escurrimiento debido a los caudales hasta  $Q_{max}$  la potencia obtenible sería  $P_{Q_m}$ , que corresponde precisamente al caudal medio del curso de agua.

En el caso de usar el caudal mínimo, conocido también como caudal firme, la potencia que se obtendría sería

la producida por dicho caudal, pues no existe necesidad de compensaciones.

La combinación de las curvas de dichos caudales máximos y medios en un par de ejes coordenados nos lleva a una nueva característica hidrológica en la que se relacionan los caudales disponibles con las potencias obtenibles, de acuerdo al alcance de la regulación de esos caudales. Este concepto se aclarará con el análisis del gráfico 3.3, figura 1.

Si la instalación está diseñada para un caudal  $Q_1$  cualquiera, inferior a  $Q$  medio, ésta utilizará el segmento  $V_n$  de volúmenes naturales, más el segmento  $V_c$  de volúmenes regulados, y habrá un remanente de volúmenes correspondiente al segmento  $V_e$  que queda hasta alcanzar la línea de escurrimientos totales.

La utilización óptima del curso se obtendrá, como puede verse, cuando la instalación utilice el caudal  $Q_m$ , pues la adición de los segmentos que representan volúmenes naturales y regulados llega a la línea de escurrimientos totales, produciendo la potencia  $P_{Q_m}$ .

En los extremos, puede construirse la instalación para el caudal  $Q_{min}$  con lo que no habrá necesidad de compensaciones pero se tendrá un gran volumen sobrante, o puede construirse para el caudal  $Q_{max}$  con lo cual se usará todo el escurrimiento pero habrá necesidad de compensar el volumen

### Grafico 3.3

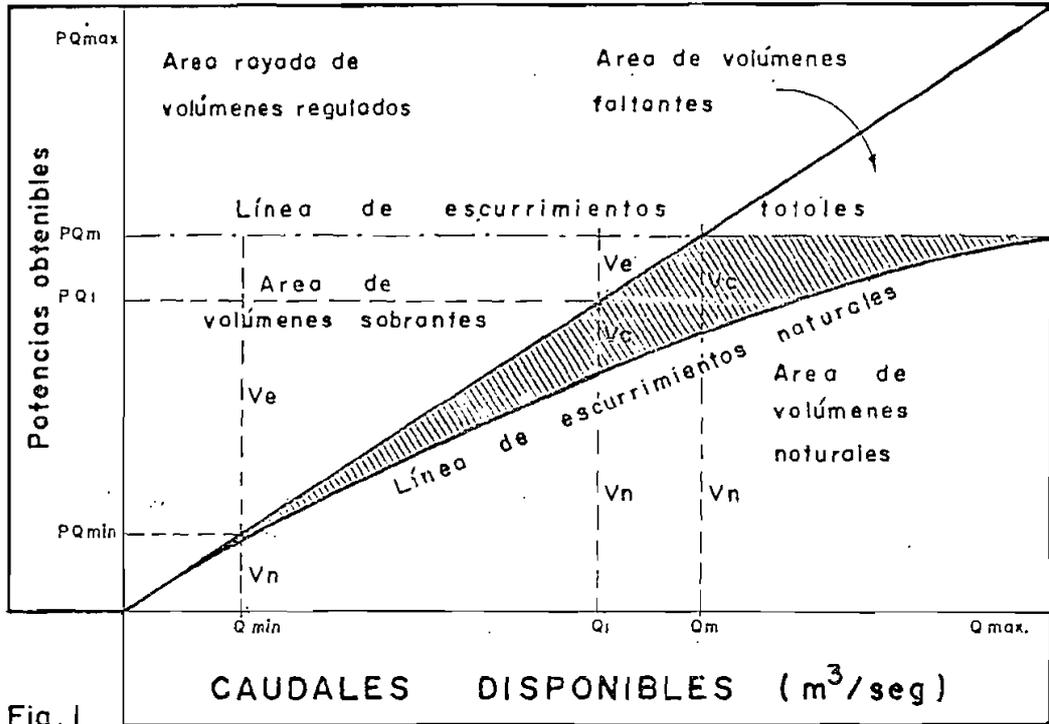


Fig. 1

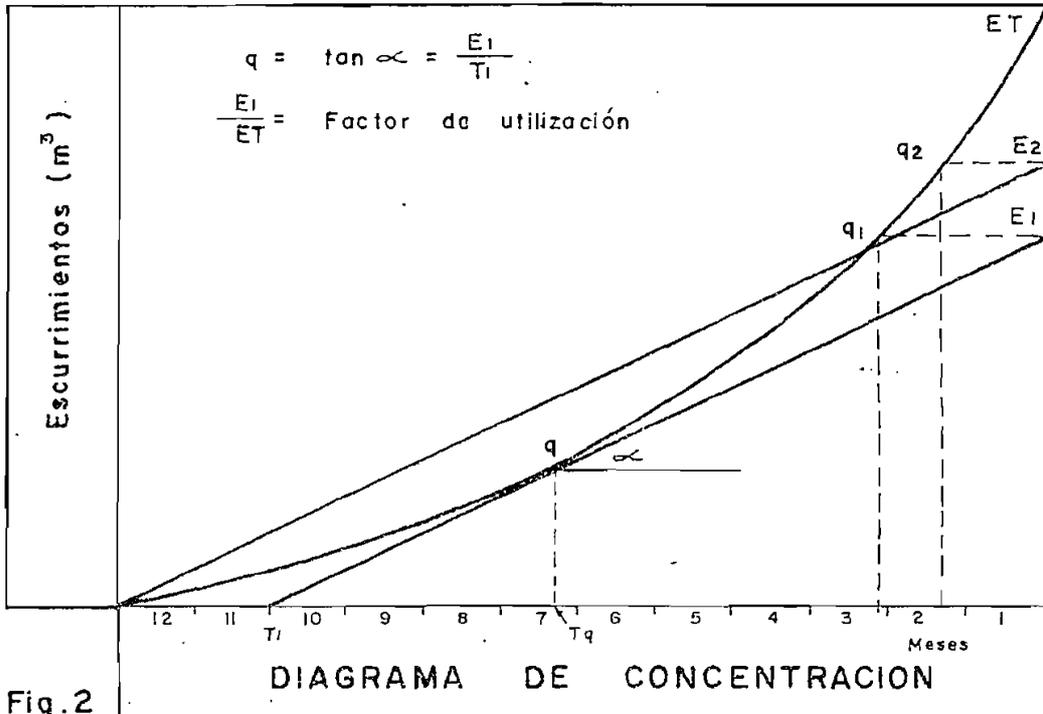


Fig. 2

$$q = \tan \alpha = \frac{E_1}{T_1}$$

$$\frac{E_1}{ET} = \text{Factor de utilización}$$

faltante con aporte extra que puede provenir de otra cuenca o ser producido por bombeo, si se quiere que la instalación trabaje con potencia firme todo el año.

En el mismo gráfico se puede apreciar que el curso de agua será más favorable cuando la línea de escurri - mientos naturales tenga mayor pendiente y se acerque más a la recta inclinada de referencia de las compensaciones, con lo cual el area que representa los volúmenes faltantes será menor, aproximandose a un curso ideal de flujo constante.

Como tercera característica hidrológica se - tiene el diagrama de concentración que es el integral ordenado de caudales de acuerdo a su duración y se lo obtiene integrando el diagrama de duración con relación al tiempo. Las ordenadas representan las areas progresivas encerradas por la curva de duración, las mismas que equivalen a los escurrimientos producidos por caudales ascendentes durante los tiempos absolutos de presencia de los mismos.

Un punto cualquiera de la curva es función de un caudal definido, por encima y por debajo del cual se hallan caudales mayores y menores que él. Una tangente a la curva en ese punto, cuya pendiente representa el caudal en esa parte de la curva, determinará en las ordenadas un valor de escurrimiento y en las absolisis el tiempo necesario para producir ese escurrimiento mediante un caudal constante e igual al determinado por la pendiente de dicha tangente.

En el caso del ejemplo del gráfico 3.3, figura 2, si se adopta para el funcionamiento de una instalación una descarga constante cualquiera igual a "q", ésta absorberá un volumen "E1" actuando durante 10 meses en el año, correspondiente al escurrimiento que producen los caudales naturales menores a "q1". Si la misma descarga "q" tuviera que actuar durante los 12 meses del año, absorbería un volumen "E2", correspondiente al escurrimiento producido por los caudales naturales menores a "q2". Por lo tanto, la diferencia de los volúmenes E1 y E2 representa la deficiencia que la instalación soportaría si, usando los caudales menores a q1, mantiene la descarga q durante todo el año. Dicho de otro modo, la instalación necesita usar los caudales menores a q2 para mantener tal descarga.

#### 3.4. Afluencia

Cuando no se disponen de suficientes registros de los caudales del río en el que se planea una utilización, se recurre a determinar la afluencia de la cuenca de recolección tributaria del río y se busca la correlación existente entre ésta y los escurrimientos. Tal correlación se analiza rápidamente en los párrafos siguientes.

Las precipitaciones en una cuenca hidrográfica constituyen un factor fundamental del caudal de los cursos de agua existentes en ella. La cantidad de lluvias que cae -

en una cuenca varía año a año, e igualmente varía su distribución anual, dependiendo de factores generales como la altitud y latitud de la zona o el régimen de vientos, y de factores particulares como la orografía, la vegetación, etc.

Analizando los valores que han alcanzado las precipitaciones y estudiando su distribución dentro de la cuenca, puede calcularse el caudal en el sitio de captación del sistema fluvial en que se va a instalar una utilización. Las precipitaciones se miden mediante una red pluviométrica compuesta de varias estaciones localizadas a una determinada densidad (una cada 100 Km<sup>2</sup>), debiendo extenderse las observaciones por un período de al menos 10 años si se quieren tener datos reales del comportamiento de los regímenes de lluvias, pues como en el caso de nuestro país, el ciclo periódico de precipitaciones dura aproximadamente 7 años.

Calculada la altura de agua de lluvias en un año (mm) y dividida para la superficie de la cuenca (Km<sup>2</sup>), se obtiene la afluencia de la cuenca (A).

Cuando se usan los registros pluviométricos para calcular el caudal en el sitio de captación es necesario establecer el balance hidrológico de la cuenca de recolección, el que consiste en definir la afluencia para un tiempo determinado y el escurrimiento (E) o agua que se evacúa por el río en el mismo tiempo. La diferencia entre estos dos valores, afluencia menos escurrimiento, es igual a las pérdidas en la

cuenca:

$$P = A - E$$

El llamado coeficiente de escurrimiento tiene la forma:

$$C = (A - P) / A,$$

de donde se concluye que,

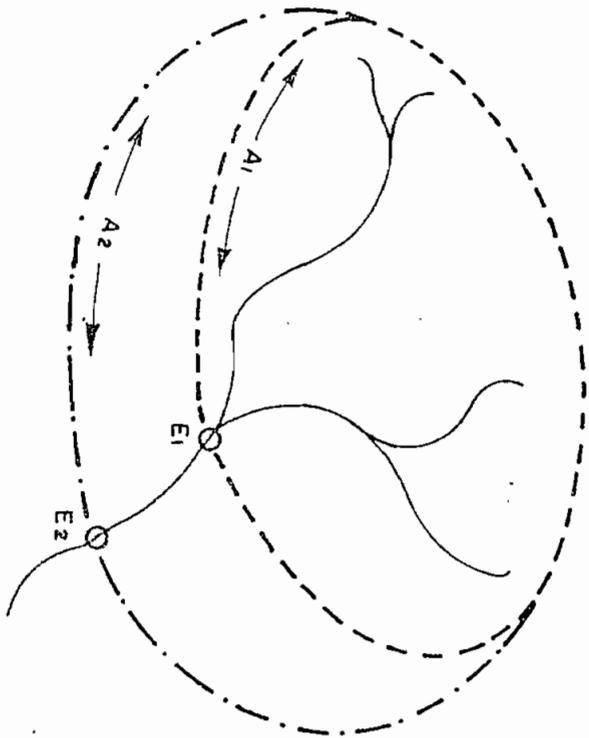
$$E = C \cdot A,$$

ecuación que define a dicho balance hidrológico, muy importante en la evaluación de la cuenca hidrográfica.

Determinado el coeficiente de escurrimiento en la forma indicada pueden calcularse los valores de conversión de la cuenca que dan directamente los caudales diarios en el sitio de captación, contando con los registros de precipitaciones. El caudal mensual se calculará en base a estos caudales diarios y se clasificará en orden hidrológico para obtener la duración anual de la descarga.

En un sistema hidrográfico de características homogéneas puede usarse el coeficiente de escurrimiento para calcular el caudal en otro sitio que no sea el de la captación mencionado. Según el gráfico 3.4, figura 1, el escurrimiento en el punto E1 es proporcional a la afluencia del área A1; el escurrimiento en E2 es proporcional a A2, siendo el factor de proporcionalidad igual en los dos casos e igual al

Gráfico 3.4



$$E_1 = CA_1$$

$$E_2 = E_1 (A_2/A_1)$$

$$E_2 = CA_2$$

coeficiente de escurrimiento C de la cuenca.

Determinación del año típico. El año típico en lo relacionado a cantidad de agua se determina comparando las curvas de duración de las descargas registradas en un mismo sistema fluvial, las que se obtienen para los diferentes años que comprende la información a base de los registros hidrométricos que se toman diariamente en las estaciones de aforo.

Clasificando dichas curvas de duración de acuerdo al valor que toman los caudales, en descargas para años de crecida, ordinario y de estiaje, que no son otros que años ricos en agua, promedio y pobre respectivamente, y tomando sus valores promediales mensuales, se tienen las descargas típicas del período. Estos valores sirven de modelo de comparación con otros años de diferente descarga y de entre ellos puede escogerse el año que de acuerdo al alcance del proyecto se juzgue representativo para su cálculo.

Si la generación hidroeléctrica suministra la parte principal de la energía del sistema, el año de estiaje se lo considera como año representativo. En caso de combinación hidráulica y térmica, el año representativo será el año ordinario, pues al calcular el proyecto pueden sobreestimarse un poco las disponibilidades de caudal, aceptando la posibilidad de años que produzcan deficiencia que puede ser cubierta con generación térmica, pero consiguiendo una mayor capacidad instalada en las plantas hidráulicas.

Además conociendo la reducción en capacidad

de generación que un año seco puede ocasionar, es posible pre  
veer la potencia de reserva necesaria para cubrir esa deficiencia  
con seguridad.

### 3.5. Análisis del gasto

Caudal firme. El diseño de las centrales generadoras a circu  
lación natural, cual es el caso de las existentes en el país,  
se fundamenta en la determinación del caudal firme; que es a-  
quel que puede ser captado de un curso de agua durante 355 -  
días en el año en forma constante, sin contar con instalaciones  
de regulación.

El caudal firme correspondiente a un año hi -  
drométrico cualquiera está representado en la curva de dura -  
ción de la descarga de ese período por un rectángulo que ocupa  
la base en una longitud de 355 días y cuya altura es el mí  
nimo caudal registrado en ese tiempo. (Gráfico 3.5, figura 1)

Definido de esa manera, se comprende que una  
utilización hidráulica pueda entregar durante 355 días de un  
año hidrométrico una potencia firme equivalente al mí  
nimo caudal registrado, sin obras de compensación.

Se había mencionado el fenómeno inevitable de  
variaciones anuales en las afluencias de las cuencas hidrográfic  
as y por consiguiente de variaciones en los escurrimientos  
en los sitios de captación. Siendo así, se tendrán variaciones

### Gráfico 3.5

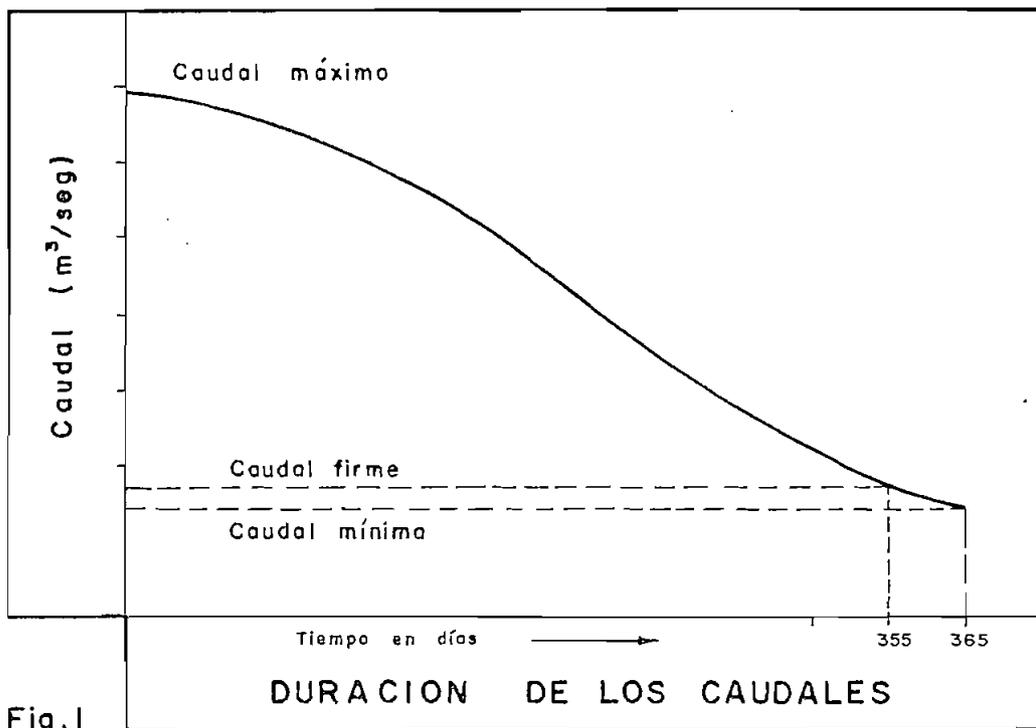


Fig.1

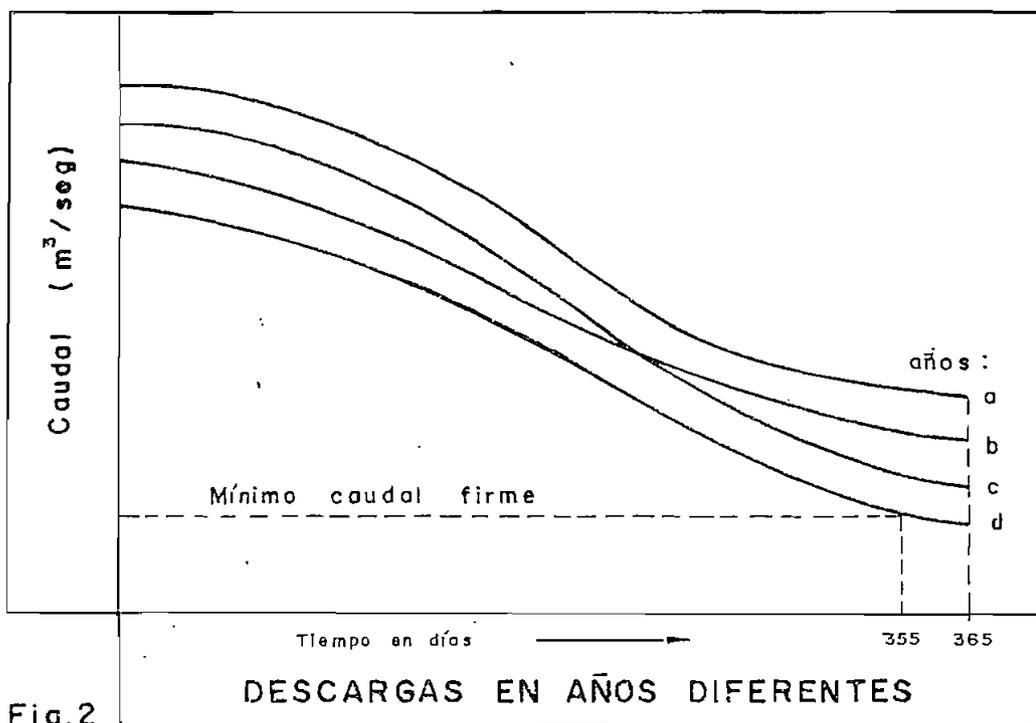


Fig.2

nes correspondientes de un año a otro en la duración de las des cargas en la forma representada en el gráfico 3.5, figura 2. En él se puede apreciar que el caudal firme será diferente según el año del cual se tome la curva de descarga.

Dependiendo de las características de la utili zación que se proyecta, puede tomarse como referencia una curva de descarga promedial de las que se tienen en el registro y determinar el caudal firme promedial anual, o tomarse la curva de mínima duración de la descarga en el período de registro - (d en el gráfico) y definir el mínimo caudal firme anual.

En un sistema eléctrico en el que no se presen tan frecuentemente grandes variaciones de la demanda máxima - mensual a lo largo del año, el alcance del proyecto puede de - cidirse usando el caudal firme promedial anual, con lo cual se desestiman en cierto grado los años de baja descarga dando im - portancia a una mayor capacidad de generación de las plantas. Sin embargo, en un sistema en que exista gran variación de la demanda máxima mensual, puede ocurrir que coincidan el mes de máxima demanda con el mes de baja descarga y se produzca un desequilibrio acentuado entre la demanda y la disponibilidad. En este caso, es usual adoptar como caudal firme el mínimo de los caudales firmes que se produzcan por un período de 25 días al mes, de entre los doce meses del año hidrológico, con lo - cual se obtiene un margen de seguridad razonable. La curva de descarga mensual tendrá una forma similar a la indicada para la descarga anual y el caudal firme mensual tendrá las mismas

características que el señalado para un año, pero para un tiempo de 25 días.

Regulación del caudal. Cuando se desea usar el agua con una descarga uniforme, o cercanamente uniforme, mayor que el caudal mínimo del río que alimenta la utilización, es necesario, como ya se ha dicho y puede desprenderse de los análisis anteriores, dotar a las instalaciones de una cierta capacidad de almacenamiento en la cual reservar el agua durante los períodos de abundancia para usarla en los períodos de baja.

Para determinar la capacidad de almacenamiento necesaria para varias cantidades de uso que pueden ser factibles, o más importantes aún, para obtener el máximo provecho posible de la utilización mediante la regulación más eficiente de los caudales, se hace uso del diagrama integral de caudales; en el cual las pendientes de las tangentes a la curva son numéricamente iguales a las ordenadas correspondientes del hidrograma, o sea iguales a los caudales que determinan el punto en el que se traza la tangente.

Comparando la curva de volúmenes que aparece en el gráfico 3.6, figura 1, con una recta que partiendo del origen de los ejes representa una descarga uniforme cualquiera a lo largo del año, puede llegar a determinarse el almacenamiento necesario para cubrir esa descarga de la manera indicada a continuación:

### Grafico 3.6

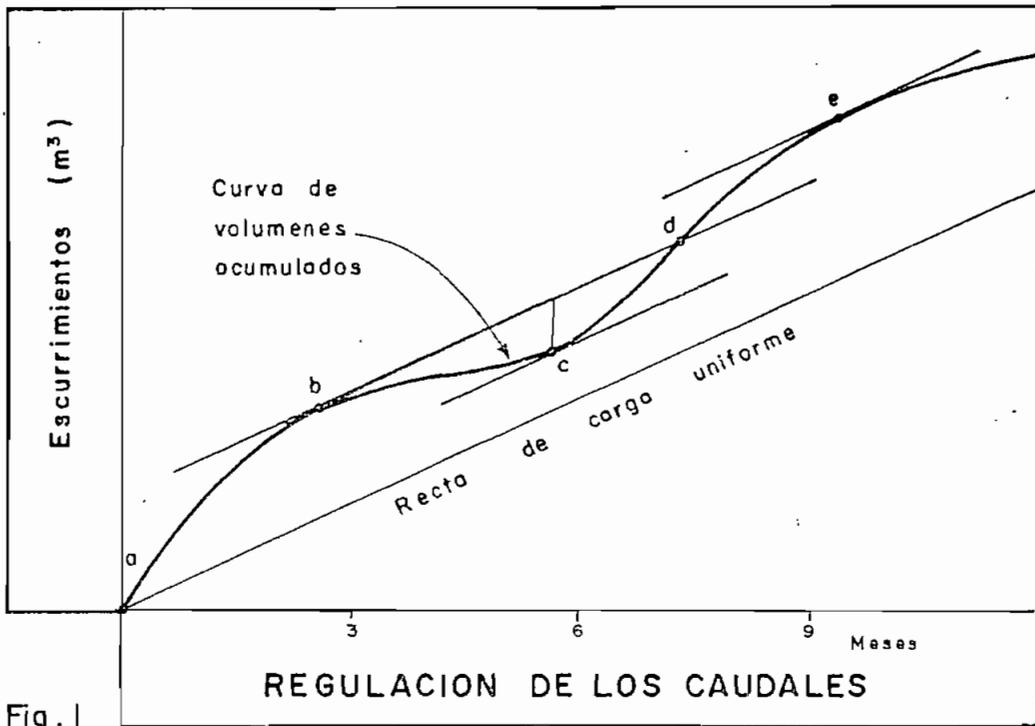


Fig. 1

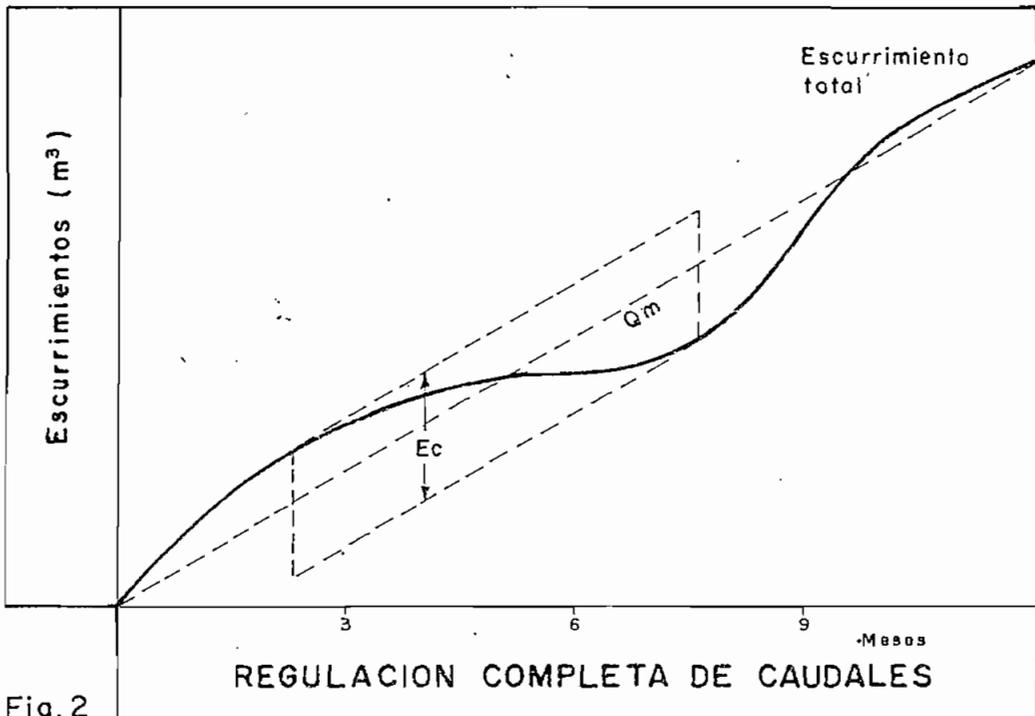


Fig. 2

Se trazan líneas paralelas a la recta y tan -  
gentes a la curva las cuales determinan los puntos b, c y e.  
Durante los períodos a-b y c-e, cuando la pendiente del dia -  
grama de volúmenes es mayor que la pendiente de la recta que  
representa la descarga, el caudal afluyente del curso de agua  
al reservorio es mayor que dicha descarga; mientras que durante  
el período b-c, el caudal es menor que la descarga por ra -  
zones análogas.

Si se asume que el reservorio se encuentra -  
lleno al comenzar el año, en a, entónces la línea abde repre -  
senta un diagrama de caudales acumulados cuyo caudal mínimo  
es igual a la descarga. La pendiente de la tangente en cual -  
quier punto de esta línea representa la dsscarga en ese momento  
mientras que el punto de la línea abcde correspondiente a  
la misma abscisa representa el caudal afluyente en ese mismo  
momento. El segmento de ordenada que queda entre estos dos -  
puntos representa entonces la diferencia, o también la canti -  
dad de agua que el reservorio necesita evacuar para suplir e -  
sa diferencia. Por supuesto, la distancia mayor es la mayor  
deficiencia representada y es igual al volumen necesario pa -  
ra suplir la descarga en el período más crítico.

Estudiando el mismo gráfico puede obtenerse  
la siguiente información que ayuda a comprender el proceso:

1) Del punto a al punto b, el caudal (Q) excede la descarga

- (D) y existe desbordamiento.
- 2) En el punto b,  $Q = D$ , el reservorio está lleno, pero no existe desborde.
  - 3) Del punto b al c,  $Q$  es menor que  $D$  y hay extracción del reservorio.
  - 4) En c,  $Q = D$  y la reducción del nivel es máxima.
  - 5) Del punto c al d,  $Q$  es mayor que  $D$  y el reservorio se rellena.
  - 6) En d el reservorio está lleno nuevamente.
  - 7) Del punto d al punto e se repite el proceso.

En el caso de planear la utilización completa de los caudales disponibles, la recta que determine la mayor eficiencia será aquella recta ideal que represente la acumulación del caudal medio anual ( $Q_m$ ) y cuya pendiente determine al fin del año un escurrimiento igual al escurrimiento total del curso. El volumen de almacenamiento necesario para tal caso estará dado por la diferencia entre los puntos más alejados de la curva de escurrimientos naturales, referidos a las ordenadas, y como se ve en el gráfico 3.6, figura 2, corresponde a  $E_c$ .

Caudal de avenida. Dentro de las obras de seguridad, los vertederos que se proveen a las obras de contención están diseñados para evacuar el caudal de avenida o creciente máxima del curso de agua, y su cálculo se basa en la estimación del caudal máximo que puede ocurrir si todos los factores que contri

buyen para el acumulamiento de caudal de un río concurrieran simultaneamente con sus valores más críticos.

Las crecientes son debidas primariamente a los escurrimientos de superficie, por lo que, todos los factores que afectan a estos escurrimientos también afectan a las crecientes. Estos factores pueden ser de dos categorías, aquellos que determinan la intensidad de las tormentas que caen en las cuencas de recolección, y aquellos relativos a las características físicas de la cuenca que afectan y determinan la evacuación del agua lluvia hacia los cauces naturales.

Ninguna estructura de importancia debe ser diseñada o construída en una utilización hidráulica sin tener en cuenta el peligro al cual puede estar sujeta o el daño que puede ocasionar por causa de una creciente. La máxima cre ciente que una estructura debe soportar es la llamada creciente de avenida o caudal de avenida, cuyas características de ben determinarse con la mayor certidumbre: magnitud y probabilidad de ocurrencia.

Existen diferentes procedimientos para determinar la magnitud de una creciente que puede esperarse ocurra en cualquier curso de agua con una determinada frecuencia promedio;

- a) Métodos estadísticos basados en registros de observación de crecientes ocurridas en un adecuado término de años pasados.

- b) Métodos basados en la relación existente entre las precipitaciones y los escurrimientos que tienen la ventaja de no requerir sino pocos datos relativos a ese primer factor.
- c) Métodos basados en fórmulas empíricas aplicables a determinadas cuencas de características particulares.

Obviamente el método estadístico y de probabilidades es el procedimiento más lógico en la predicción de la ocurrencia del fenómeno, al basarse en los registros del pasado. Desafortunadamente, este método ofrece buenos resultados solamente cuando se disponen de suficientes registros en los cuales basar tal determinación y cuando no han habido importantes cambios en el régimen del torrente durante o después del período de registro.

El registro consiste en la contabilización del número de crecientes ocurridas dentro de ese período y durante las cuales el máximo flujo de 24 horas cae dentro de límites graduales preestablecidos. Para aclarar el concepto se inserta el ejemplo del anexo 3.1, correspondiente a un curso de agua para el cual se han contabilizado las crecientes por un período de 54 años.

Analizando dicho ejemplo puede observarse que solamente el 6,5 por mil de las 153 crecientes contabilizadas como tales en 54 años sobrepasa los 2.000 m<sup>3</sup>; que el 26,1 % excede los 1.000 m<sup>3</sup>; y que todas las crecientes, o sea las 153, son mayores que 600 m<sup>3</sup>. Los resultados del cálculo pue-

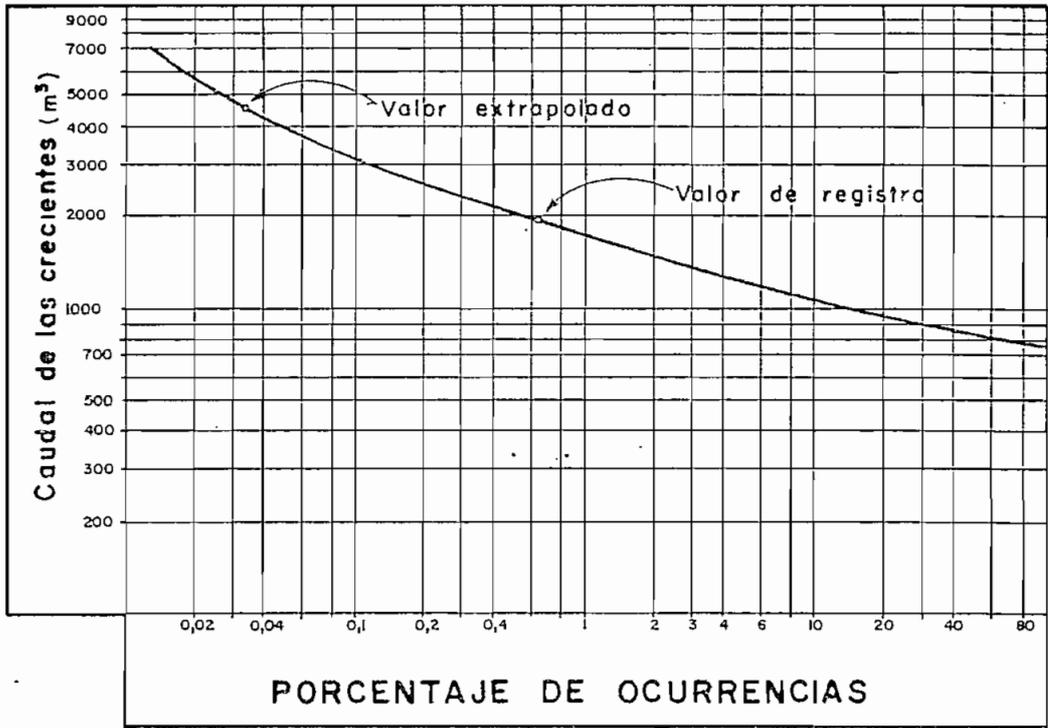
den ser llevados a un gráfico de valores de descarga registrados en las crecientes, contra porcentajes de ocurrencia, como el indicado en el gráfico 3.7.

Debido a la importancia que tienen los valores más altos de la descarga, los mismos que ocurren en porcentajes tan bajos como el 1 %, es conveniente para su buena interpretación dibujar esta curva en escala logarítmica.

Teniendo como referencia dicho gráfico, supóngase que se quiere determinar la máxima creciente que puede esperarse ocurra con una frecuencia de una vez en 1.000 años (lo que quiere decir que hay una probabilidad en mil de que realmente ocurra en cualquier momento, y no una vez después de mil años como erróneamente podría pensarse). Puesto que los registros indican que el número total de crecientes ocurridas en un período de 54 años es de 153, o sea 2,83 crecientes por año, quiere decir que en 1.000 años ocurrirán 2.830 - crecientes; siendo una, la más grande que puede esperarse ocurra en ese período, la determinada por un porcentaje de ocurrencia de  $100/2.830$  por ciento, equivalente al 3,5 por diez mil del tiempo. Recurriendo al gráfico se puede apreciar fácilmente este porcentaje y extrapolando se obtendrá el valor de 4.500 m<sup>3</sup> para la descarga de esa creciente.

Entre los métodos basados en las precipitaciones el más antiguo y conocido es el de la llamada "fórmula racional" que expresa lo siguiente:

Gráfico 3.7



$$Q = C \cdot I t \cdot A$$

en donde, Q es el valor del caudal de avenida en un punto específico de la cuenca, A es el area de drenaje tributaria de ese punto específico, It es la intensidad de lluvia promedial sobre el area de drenaje durante el período crítico "t" y C es el coeficienté de escurrimiento o sea el porcentaje de lluvias que se convierten en escurrimiento de superficie.

El período crítico para el cual se promedia la intensidad de lluvias es èl tiempo que hace de Q un máximo y corresponde al llamado tiempo de concentración, que es el tiempo requerido por el caudal de avenida para llegar al punto específico desde el punto más alejado de la cuenca. Este tiempo está dado por la igualdad:

$$T = W / L$$

en donde, W es la velocidad de propagación de la creciente y L es la distancia entre los dos puntos.

La velocidad de propagación puede determinarse por la fórmula de "Rziha" o las igualdades de "Kraven". La primera sirve para areas montañosas, mientras que las segundas para areas planas.

Fórmula de Rziha:

$$W = 72 (H / L)^{0,6}$$

Igualdades de Kraven:

$W = 12,6$  cuando  $H/L$  es mayor que  $0,01$

$W = 10,8$  cuando  $H/L$  está entre  $0,01$  y  $0,005$

$W = 7,6$  cuando  $H/L$  es menor que  $0,005$

En ambos casos,  $H$  es la diferencia de cota entre los dos puntos.

ANEXO 3.1.

Registro de crecientes de un curso de agua para un período de 54 años.

Valores de las crecientes (M3)	Número de ocurrencias	Sumatorio de las ocurrencias	%
2.000 - 2.500	1	1	0,65
1.700 - 2.000	5	6	3,9
1.400 - 1.700	3	9	5,9
1.250 - 1.400	7	16	10,5
1.100 - 1.250	13	29	19,0
1.000 - 1.100	11	40	26,1
900 - 1.000	13	53	34,6
850 - 900	19	72	47,0
800 - 850	20	92	60,1
750 - 800	23	115	75,1
700 - 750	31	146	95,4
650 - 700	6	152	99,3
600 - 650	1	153	100,0

## CAPITULO IV. BASES Y CRITERIOS PARA EL PLANEAMIENTO DE LA UTILIZACION

### 4.1. Desarrollo integral de la cuenca

El aprovechamiento integral de una cuenca hidrográfica consiste en extraer el máximo beneficio posible de sus cursos de agua, de sus accidentes topográficos, y aún de los fenómenos meteorológicos que se suscitan en ella. Desde este punto de vista, los programas de desarrollo hidroeléctrico están estrechamente relacionados con otros programas para uso de las aguas y a su vez tiene relación de dependencia con programas integrales, más complejos y completos, que se formulan para desarrollar los recursos de toda índole, inclusive humanos, existentes en las cuencas. Por tanto, al planear los programas de aprovechamiento de una cuenca habrá que comenzar por analizar los diferentes aspectos que pueden estar involucrados en su desarrollo y que a su vez responden a otros tantos programas para su desarrollo particular. Entre estos pueden estar los programas de demanda y suministro de energía eléctrica, los programas de utilización de la tierra y preservación de las áreas útiles (regadío y control de crecientes), los programas de salubridad y saneamiento ambiental (agua potable y drenaje de aguas servidas), los programas de expansión industrial (abastecimiento de agua), etc.

Cada una de estas facetas del desarrollo general puede ser concebida y ejecutada en forma independiente, pero este hecho dará lugar a que las obras complementarias y las actividades conexas que éstas generan se multipliquen originando una notable disgregación de recursos, la que puede ser evitada si los programas se complementan formando parte del aprovechamiento integral.

A pesar de todas las implicaciones que aparecen al planear el desarrollo de una cuenca, en verdad éste se reduce a encontrar los medios adecuados de controlar y aprovechar en forma económica los recursos hidráulicos existentes en ella, adaptándolos a los diferentes tipos de consumo. Esta aseveración se confirma al analizar las características de los abastecimientos y la tendencia de la demanda del agua en sus diversos aspectos.

Desarrollo hidroeléctrico. La forma convencional usada en la repartición de cargas a las diferentes centrales de un sistema, la misma que asigna a las centrales térmicas los picos - diarios y las variaciones estacionales, va haciéndose en el presente poco económica debido al mejoramiento de la eficiencia en las instalaciones de vapor y al considerable aumento en el tamaño de las plantas logrados en los últimos años. Estos factores han determinado una apreciable reducción de los gastos de operación de las centrales térmicas, permitiendo - que en su lugar se usen las plantas hidráulicas con almacena-

miento para suplir la carga de las horas de pico, aprovechando además las ventajas de la maniobrabilidad y del grado de desuniformidad que ofrecen estas últimas.

Por lo tanto, el desarrollo de una cuenca con el fin exclusivo de un aprovechamiento hidroeléctrico no siempre ha de ser económicamente factible, pero puede justificarse en cambio cuando forme parte de un programa integral de aprovechamiento múltiple de las aguas existentes en ella.

Uso industrial y doméstico de las aguas. La descarga de una central como Cumbayá del sistema de Quito puede ser suficiente para abastecer las necesidades de agua para uso doméstico de una ciudad como Buenos Aires en los actuales momentos, aunque no podría decirse lo mismo del agua necesaria para consumo industrial. Entonces, juzgando desde el punto de vista de la cantidad, no existen dificultades para suministro doméstico de agua a las ciudades, aún en las épocas de estiaje, si se trata del suministro planeado dentro de la utilización integral de un curso.

Por otra parte, los centros industriales demandan cada vez mayor cantidad de agua de acuerdo a su crecimiento, hasta tal punto que en muchas ciudades se la suministra mediante conducciones especiales separadas de las del consumo doméstico, lo cual da la medida de la importancia que a este renglón del consumo debe darse cuando se planifica la u-

tilización de un curso fluvial.

Suministro de agua para riego. La utilización del agua de los ríos, especialmente en un país de economía agraria como el nuestro, debe hacerse teniendo como premisa el abastecimiento a los cultivos. Este criterio es aplicable desde luego enfocando la economía global del país, sin entrar en análisis de condiciones particulares que pueden afectar a sectores específicos de producción que demanden trato preferente, pues cuando se planea un desarrollo integral han de establecerse las prioridades que sus finalidades exijan.

En una suposición ideal, si se tuviera un curso de agua que suministre en forma constante agua para riego, los cultivos que se sirvan de ese caudal estarían limitados a una determinada producción, sin posibilidades de incremento, supuesto que se empleen medios técnicos fijos. Pero en la realidad el caudal de los cursos de agua varía año a año dentro de los períodos de lluvias, sin que se rija por una regla determinada. Por esta circunstancia los cultivos se desarrollan comparativamente mejor en los años lluviosos que en los años secos, dándose el caso de que en períodos de estiaje se llegan a perder cosechas enteras de un determinado producto.

La solución que primero se antoja ante estas circunstancias es controlar el caudal de los ríos represándolos en épocas de abundancia para distribuirlos en las sequías,

medida con la que se puede conseguir estabilidad en la producción y mejores condiciones para la implementación de los programas agrícolas a largo plazo. Sin embargo, la dotación de obras con este fin único no siempre resulta económico debido a que las necesidades de agua para los cultivos se presentan tan solo pocos meses en el año, debiendo pasar el resto del tiempo las instalaciones sin actividad. Entonces se supondrá acertadamente que el suministro de agua para riego debe ser parte de una utilización integral de las cuencas hidrográficas, que contemple el uso del agua para otros fines además de éste.

Control de las crecientes. La idea que comunmente se aplica para controlar las crecientes consiste en desalojar los caudales excesivos de los ríos en una forma inmediata, evitando los daños que pueden causar las inundaciones en zonas habitadas o cultivadas. Este desalojo se hace según el concepto tradicional mediante la construcción de canales de desvío, embalses o ampliaciones del cauce, pero en todo caso manteniendo los caudales de creciente y en muchos casos acelerando la velocidad del agua o elevando su nivel.

Esta modalidad ha ido perdiendo vigencia en muchos países por los inconvenientes que presenta ante las crecientes inesperadas y por el desarrollo de la técnica en la construcción de grandes represas, factor este último que ha permitido que gane terreno la idea contraria; almacenar el agua por un tiempo hasta que sea posible desalojarla en forma

controlada cuando no útil.

De lo expuesto se desprende que la utilización de las aguas de una cuenca no se limita solamente a buscar su mejor aprovechamiento, sino también a controlar los fenómenos naturales que las convierten en perjudiciales. Entonces, la necesidad de lo que se ha llamado desarrollo integral no puede ser objetada sino desde posiciones relativas a las disponibilidades económicas, pues como se puede apreciar, una utilización se convierte en una obra de magnitud que demanda inversiones cuantiosas.

#### 4.2. Análisis de los almacenamientos

La función de los reservorios que almacenan el agua durante la épocas o estaciones de lluvias es la de suministrarla en las épocas de estiaje, regulando de este modo el caudal del río del cual se capta el agua. Por lo tanto, los reservorios deben tener capacidad suficiente para almacenar una cantidad de líquido tal que cubra las necesidades, generalmente múltiples, para las que fue proyectado.

El almacenamiento total de una utilización múltiple está compuesto por diferentes capacidades correspondientes a los diferentes aspectos de la utilización, los mismos que provocan competiciones entre sí el momento de diseñar el reservorio e inclusive durante su funcionamiento, por lo que se requiere adoptar un método de operación adecuado, En

tre los aspectos que provocan competiciones se pueden citar los siguientes:

- a) El uso doméstico e industrial del agua requiere de una can tidad constante durante todo el año.
- b) La época de riego coincide con la estación de escasas llu-  
vias.
- c) El control de las crecientes requiere presas de mayor altu  
ra.
- d) La generación de electricidad exige la mayor caída posible.

El esquema de las diferentes capacidades que pueden componer un volumen de almacenamiento se ve en el grá-  
fico 4.1, figura 1, y en él se pueden distinguir:

A = Capacidad útil total

B = Capacidad efectiva para control de crecientes

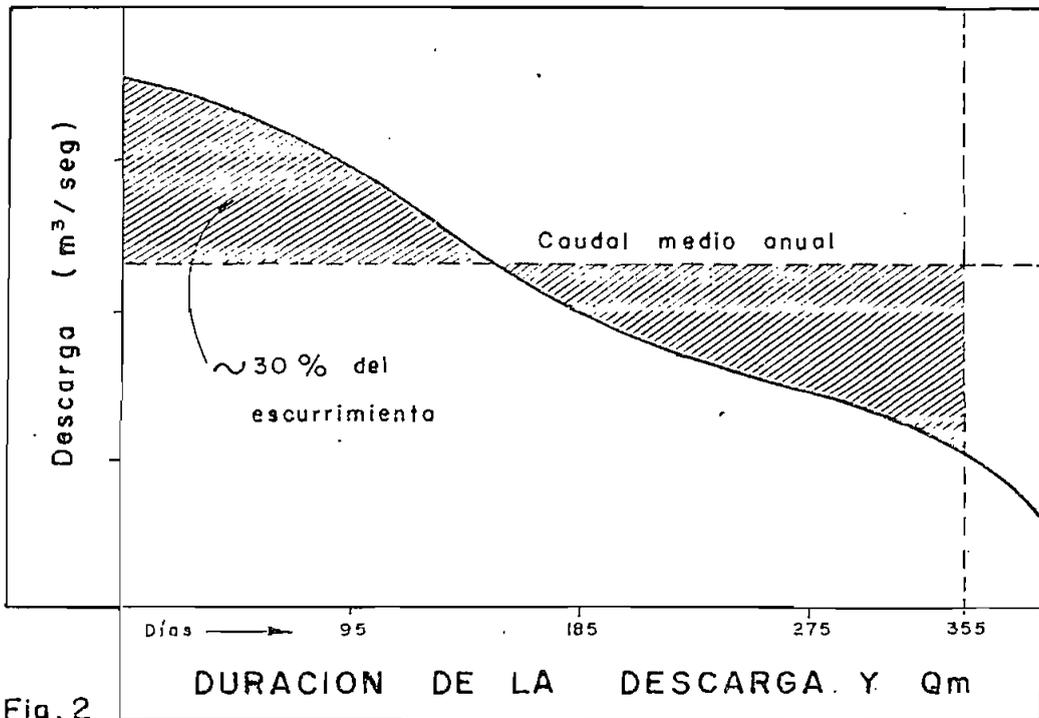
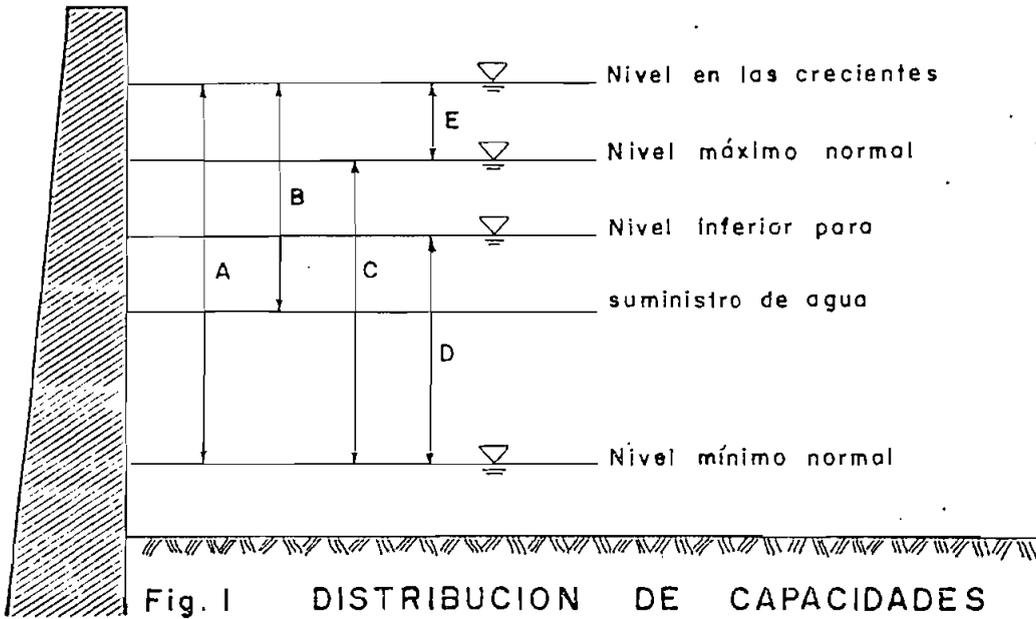
C = Capacidad efectiva para generación

D = Capacidad para generación y suministro de agua en estiaje.

E = Capacidad de sobrecarga.

Un punto de partida para determinar la capaci-  
dad del reservorio es adoptar el caudal medio anual, conside-  
rándolo como caudal regulado. Usando la curva de duración de  
la descarga se puede apreciar como el caudal medio anual de -  
termina el volumen de compensación que requieren los caudales  
inferiores a él y que deben ser compensados por los caudales  
superiores. El volumen total de una compensación en este sen-  
tido suele ser de un valor aproximado del 30 % del escurri -

# Gráfico 4.1



miento total. Gráfico 4.1, figura 2.

En la determinación de la capacidad de los reservorios es posible evaluar su eficiencia refiriéndose a ciertos factores cuyo valor los ubica dentro de patrones de características definidas e identifica en forma general el alcance de su funcionamiento. Estos factores son los siguientes:

- a) Relación de regulación, que es la relación entre la capacidad efectiva de almacenamiento ( $m^3$ ) y el escurrimiento a anual para un año promedio ( $m^3$ ). Está dado en porcentaje.
- b) Relación de relleno, que es la relación entre la descarga máxima del reservorio ( $m^3/seg$ ) y el caudal medio anual ( $m^3/seg$ ). Está dada en porcentaje.
- c) Duración del relleno, que es la relación entre la capacidad efectiva de almacenamiento ( $m^3/seg.día$ ) y la descarga máxima del reservorio ( $m^3/seg$ ). Está dada en días.

Un ejemplo del cálculo de la eficiencia de un reservorio y de la determinación de dichos factores se puede ver en el anexo 4.1.

Capacidad de almacenamiento. La idea que guía la concepción de un proyecto de utilización de un recurso hidráulico es aprovechar en la mejor forma su escurrimiento, eliminando las variaciones naturales del caudal y convirtiéndolas en valores adecuados a las necesidades de la utilización. Tratándose de un aprovechamiento hidroeléctrico, estas necesidades son más exigentes en cuanto se pretende abastecer la demanda cam-

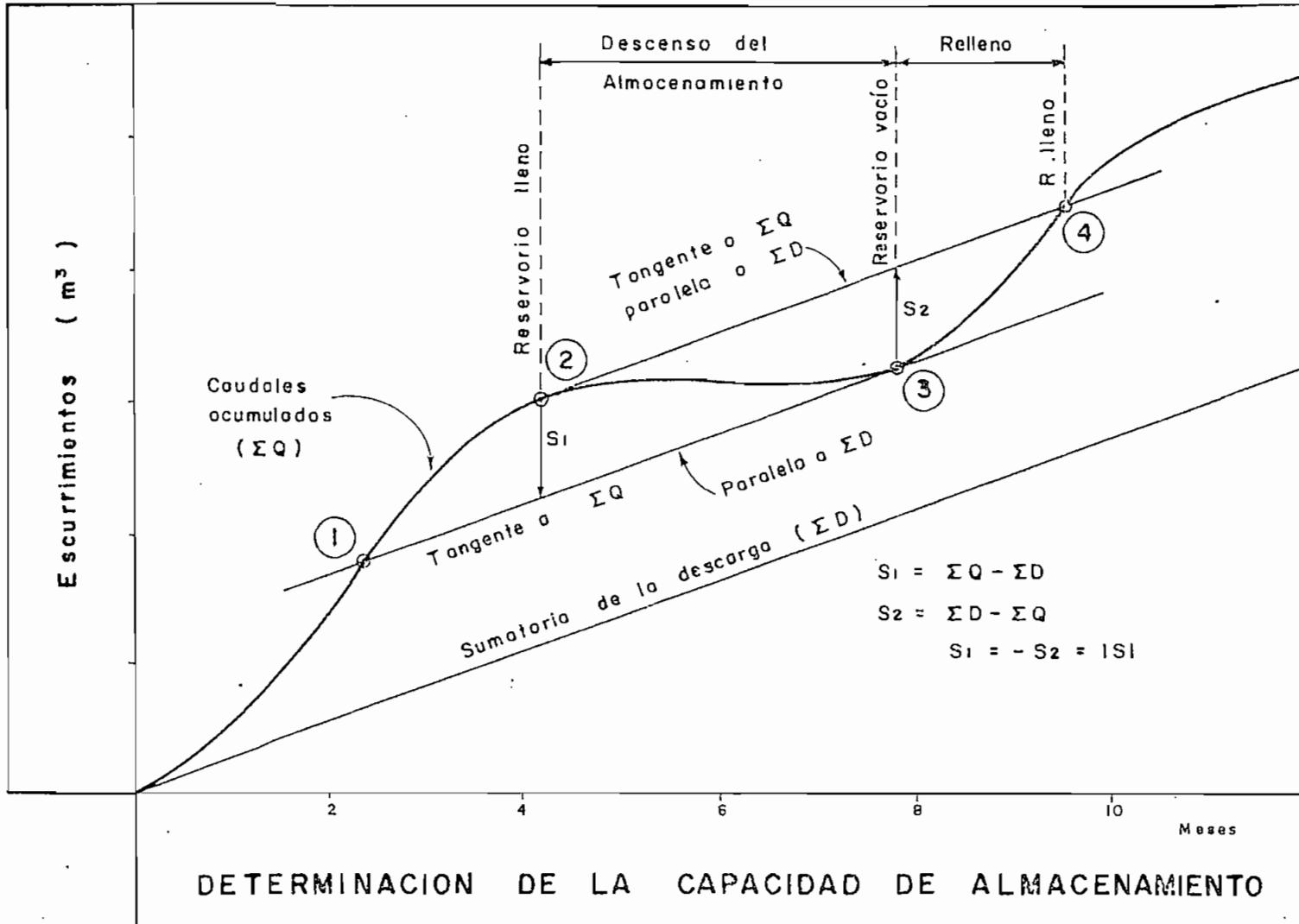
biante de los sistemas utilizando en forma óptima todo el potencial disponible en el curso de agua para este objeto, para lo cual, es imprescindible dotar a las instalaciones de un reservorio de regulación.

Existen varios métodos para determinar la capacidad de almacenamiento del reservorio que va a regular el caudal, todos ellos basados en las curvas de volúmenes acumulados o escurrimientos, partiendo de la relación existente en tre los caudales que afluyen al reservorio y la descarga que efluye del mismo. Los caudales a su vez son tomados de los registros de varios años y promediados para períodos al menos mensuales cuando no para períodos de 10 o 15 días y aún diarios, siendo más exactos los resultados mientras más pequeño sea el intervalo para el cual se promedian los caudales.

La capacidad de almacenamiento se determina por métodos gráficos o analíticos, pudiendo usarse los dos en forma paralela a fin de chequear los resultados calculados - comparándolos con las gráficas. A continuación se describe el método más conocido y usual llamado "Método Rippl", el que tiene de referencia el gráfico 4.2.

Según este método y de acuerdo al gráfico, se asume que se ha determinado un apropiado balance entre los caudales y la descarga y que el reservorio se encontrará completamente lleno al comienzo del período de sequía, es decir el momento en que la pendiente de la curva de volúmenes acumu

Gráfico 4.2



lados se hace menor que la pendiente de la recta que representa la descarga adoptada.

La capacidad de almacenamiento corresponde a la máxima cantidad de agua (S) que debe evacuarse del reservorio para mantener la descarga (D), y es igual a la máxima diferencia acumulativa entre la descarga y el caudal (Q) registrada hasta alcanzar el comienzo del subsiguiente período de sequía:

$$S = \text{Máximo valor del sumatorio } (D - Q)$$

Para determinar S pueden calcularse aritméticamente los valores del sumatorio (D - Q), o gráficamente como ya se dijo, buscando la relación entre las líneas que representan el sumatorio D y el sumatorio Q, o sea entre las líneas que representan las descargas y los caudales acumulados.

#### Explicación del gráfico.

La línea recta con origen en el cero representa la descarga adoptada de valor constante a lo largo del año, por lo que tiene una pendiente constante. Superponiéndola a la curva de escurrimientos en forma tangente en el punto de mayor desviación de la pendiente (2), que corresponde justamente al comienzo del período de sequía o de caudales menores que la descarga, se obtiene la intersección que determina el momento en que han vuelto a compensarse los volúmenes evacuados por la descarga con los volúmenes producidos por el cau -

dal (4). Los segmentos de ordenada del area que queda encerrada entre las dos líneas representan las deficiencias producidas en todo ese período, siendo el máximo valor de deficiencia la mayor separación entre las dos líneas. El punto de la curva de escurrimientos correspondiente a la máxima deficiencia presentada (3), corresponde a la terminación del período de sequía, pues desde allí los cuadales son mayores que las descargas como se puede ver trazando la tangente a este punto, paralela a la recta de las descargas, y comparando sus pendientes. Esta nueva recta intersecta la curva de escurrimientos en un punto inferior (1) determinando el momento en que se inician los acumulamientos efectivos y encerrando un area cuyos segmentos de ordenada representan los volúmenes acumulados.

Regulación de la descarga. Como se puede apreciar en el análisis anterior, la utilización del caudal de este curso de agua está limitado al rango de escurrimientos existentes entre los puntos 2 y 4 de la curva de volúmenes, en razón de haber adoptado de antemano una descarga constante. Otro es el caso cuando las descargas no son constantes o desean incluirse variantes como puede ser la de evaporación en la superficie del reservorio. En este caso el método analítico ofrece mayores ventajas que el método gráfico, aunque la grafización del proceso es una buena guía para el análisis matemático. Gráfico 4.3.

### Gráfico 4.3

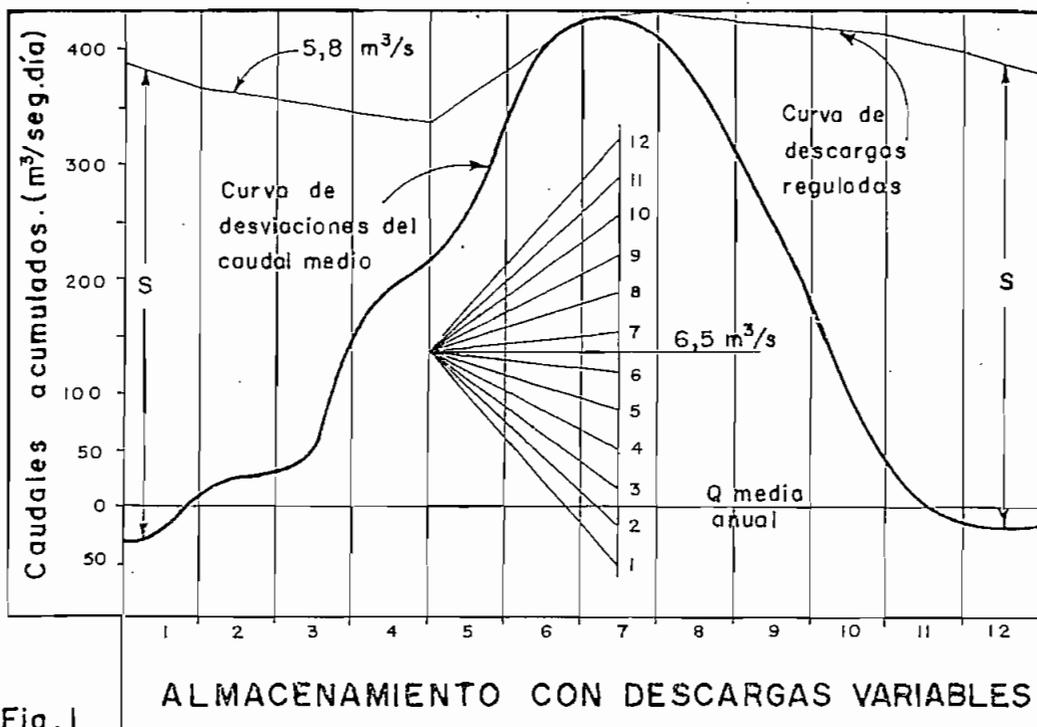


Fig. 1

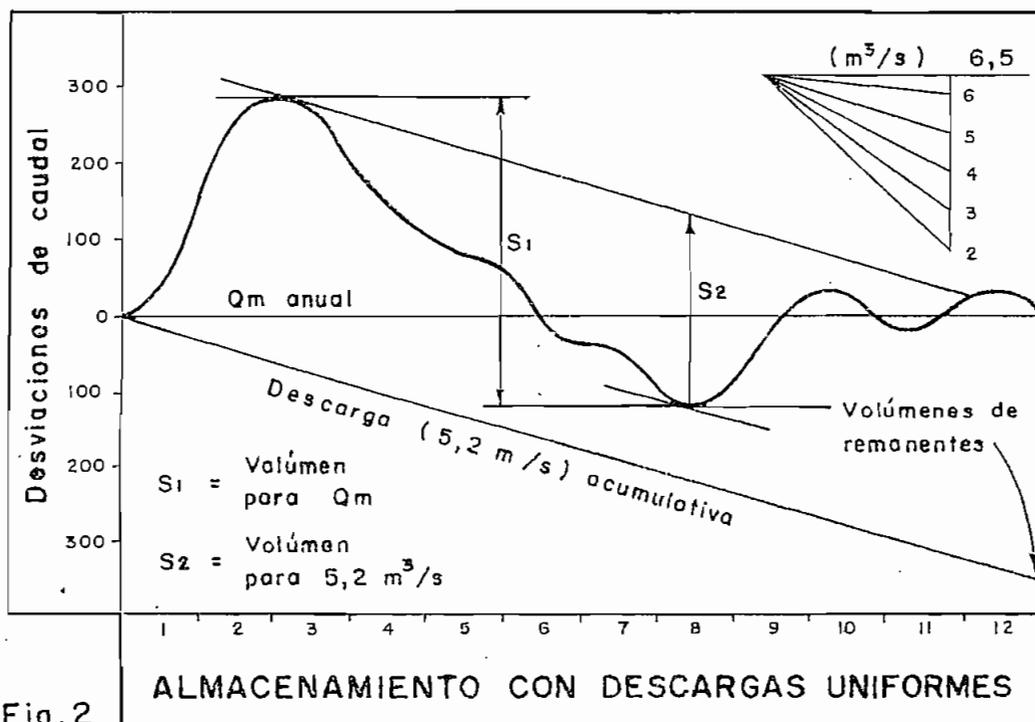


Fig. 2

Para simplificar la representación gráfica se recurre a un sistema de coordenadas inclinadas en el que se registran los excesos o déficits acumulativos de caudal (desviaciones) con respecto a la descarga promedial anual, antes que los caudales por si solos. La curva resultante abraza a una recta de referencia que coincide con el cero de la escala del gráfico de remanentes y que representa a la descarga media anual. Consecuentemente, la curva que representa los remanentes de escurrimientos tomará valores por encima y por debajo de esta recta de referencia, de acuerdo a la condición presente de acumulación de exceso de caudales o de consumo de caudales almacenados.

Puesto que la descarga de referencia es constante, la tangente en cualquier punto de la curva representa también el caudal afluente al reservorio en ese punto o momento. Además, un haz de rectas cuyas gradientes representan las descargas no uniformes diseñadas para esa utilización, servirá de referencia para ubicar en el gráfico los valores que toman las descargas en cada período, de acuerdo a la forma de operación del reservorio adoptada.

En el caso del ejemplo de cálculo que se da en el anexo 4.2, se han adoptado descargas que varían por períodos mensuales, siendo la descarga promedial anual de  $6,5 \text{ m}^3/\text{seg}$  o de  $195 \text{ m}^3/\text{seg.día}$  para el mes promedio correspondiente al año hidrológico de 360 días asumido para simplicidad del cálculo.

Como se sabe, el máximo desarrollo posible de este curso se obtendrá adoptando como descarga el caudal medio anual, y según puede desprenderse del ejemplo de cálculo, los valores de volúmenes almacenados con relación a esta descarga, y consecuentemente el máximo volumen de almacenamiento necesario para la regulación, son mayores que los volúmenes de almacenamiento que requiere la regulación mediante descargas variables por períodos mensuales, aún cuando en este último caso la descarga promedial anual es también igual al caudal medio.

Este hecho se explica pues, analizando la figura 1 del gráfico, se ve que existe alguna similitud entre las pendientes de la curva de desviaciones y de la curva de descargas, lo cual demuestra que usando descargas variables a lo largo del año se ha logrado un mejor aprovechamiento de la tendencia de los caudales naturales, evitándose un considerable volumen de almacenamiento que en caso de la descarga uniforme sería necesario.

Así pues, en el caso de adopción de una descarga uniforme, el volumen de almacenamiento está dado por la separación entre las tangentes más alejadas de la curva de remanentes (figura 2), lo cual con ser una utilización efectiva del curso no es tan eficiente en cuanto al aprovechamiento del reservorio; mientras que en el caso de descargas variables el volumen de almacenamiento está dado por el segmento de ordena-

da más grande del area encerrada por la curva de remanentes y la curva que representa las descargas efectivas (figura 1); asertos que pueden corroborarse en los resultados del ejemplo de cálculo.

La descarga regulada es pues la descarga más conveniente para el reservorio. La potencia de salida que se calculará multiplicando esta descarga por la caída efectiva que se obtiene del nivel de agua del reservorio, determinará la potencia de salida que haga la mejor utilización del potencial hidroeléctrico del curso de agua.

Valiéndose del mencionado haz de rectas del gráfico, que representa las diferentes descargas que pueden intervenir, ~~que~~ en el reservorio, es posible estudiar la utilización de una descarga cualquiera que no sea la correspondiente al caudal medio anual (figura 2). En este caso, si se traza una tangente a la curva conservando la misma pendiente de la recta que representa esta nueva descarga, se obtendrá, el volumen de almacenamiento determinado por la mayor separación entre las dos líneas (S2). Puede también presentarse el caso inverso. Si se tiene el dato del almacenamiento calculado para una utilización parcial correspondiente a una descarga cualquiera y se lo ubica como segmento de ordenada en el punto más bajo de la curva; una recta que pase por el punto superior de este segmento y sea tangente a la curva, determinará la pendiente de la descarga de esta utilización parcial

comparándola con el haz de rectas mencionado; o de otro modo, trazando una paralela a esta descarga que coincida con el punto de origen del gráfico se obtendrá en la escala de ordenadas el valor del volumen total de remanentes que permite esa descarga (puesto que el valor del escurrimiento total corresponde a los remanentes en este gráfico) y por consiguiente la descarga misma del siguiente modo;

$$V \text{ remanentes} = \text{Escorrimento total} - V \text{ descargado total}$$

Lo que en términos de caudales puede escribirse;

$$\text{Descarga} = Q \text{ medio} - Q \text{ remanentes}$$

$Q$  medio es conocido y puesto que  $Q$  remanentes es una tangente, puede calcularse dividiendo el volumen que la pendiente determina en la escala de escurrimientos para el período en el cual se produce el ciclo, en este caso un año.

Area y volumen de los reservorios. Las áreas de la superficie de un reservorio y los volúmenes de agua asociados con una determinada cota de elevación se determinan a base de un plano topográfico acotado del sitio inundado por el reservorio. Se hace la integración de las áreas encerradas en cada línea de nivel y se calculan los volúmenes existentes entre una y otra área por el método de las áreas promediales. Para intervalos entre líneas de nivel de altura uniforme " $h$ " y " $an$ " áreas encerradas, el volumen de agua almacenada entre " $n$ " líneas de nivel es igual a:

$$V = h \left( \frac{a_0 + a_1}{2} + \frac{a_1 + a_2}{2} + \dots + \frac{a_{n-1} + a_n}{2} \right)$$

$$V = h \left( \frac{a_0 + a_n}{2} + (\text{sumatorio de } a)_n^{n-1} \right)$$

Las áreas de la superficie y los volúmenes encerrados que no coincidan con las líneas de nivel se interpolan satisfactoriamente si se grafizan curvas a base de las alturas medidas y las áreas y volúmenes encerrados por esas alturas. El gráfico 4.4 indica tales curvas.

Es de notar que el volumen puede conocerse integrando el área encerrada por la curva del área del reservorio y la abscisa de la elevación correspondiente. Para los reservorios de almacenamiento la curva de volúmenes es aproximadamente matemática y está dada por la ecuación;

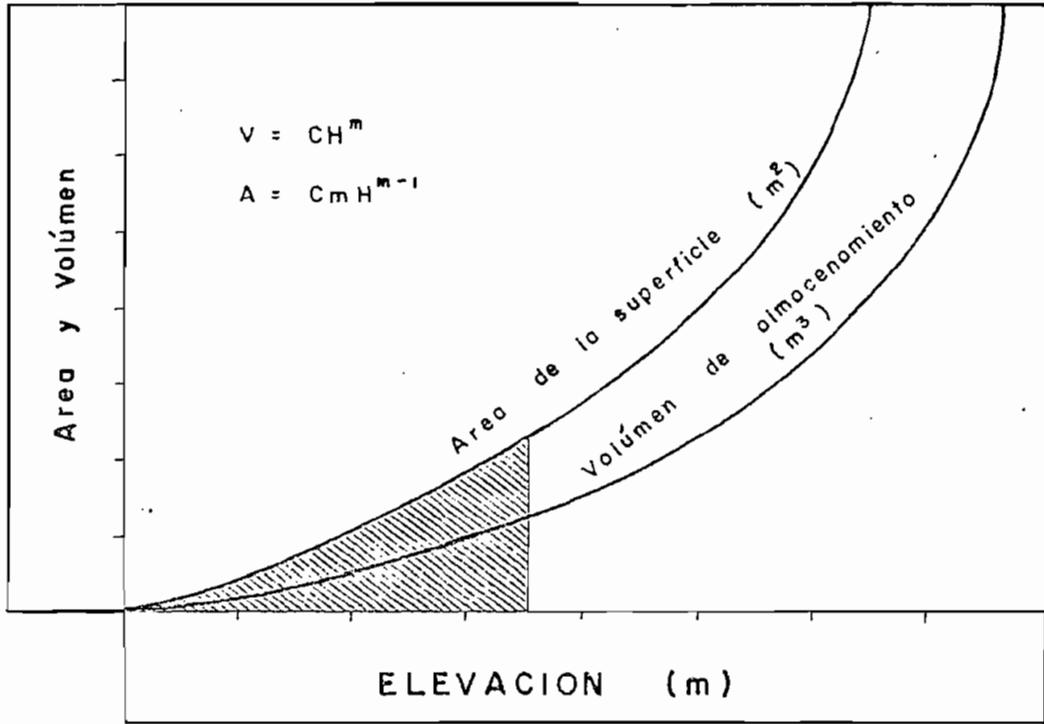
$$V = C \cdot H^m$$

en la que, H es la altura del agua y C y m son constantes para un reservorio específico. La curva del área, consecuentemente, es aproximada a la primera derivada de la ecuación del volumen:

$$A = m \cdot C \cdot H^{m-1}$$

En la operación del reservorio el almacenamiento útil generalmente excluye una pequeña cantidad de agua

Gráfico 4.4



que permanece bajo la solera de las obras de captación o aquella que contiene mucho sedimento de fondo.

#### 4.3. Alcance de los proyectos

La escala del desarrollo de una utilización hidroeléctrica dependerá de la manera en que se usen los caudales disponibles para ese proyecto, esto es, de la manera en que se operen las centrales generadoras que usan esos caudales. Entonces, el alcance de un proyecto dependerá del tipo escogido de central generadora que vaya a utilizar esos caudales.

De acuerdo a la forma de operación de las centrales, éstas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

Centrales sin regulación de caudal. En este tipo de centrales el agua que pasa a través de la bocatoma es conducida directamente a la planta generadora sin que exista regulación del caudal captado y sin que tome parte en las fluctuaciones de carga del sistema, estando diseñadas por lo tanto para trabajar con una potencia constante. De este tipo de plantas se encuentra generalmente en las centrales de circulación natural que trabajan con el caudal firme, por lo que su potencia de salida tiene un valor medio diario constante, pudiendo tomar la carga de base con una eficiencia razonable para el sistema.

Centrales con depósito compensador. En este otro tipo de cen

trales se consigue un aprovechamiento algo más efectivo de los caudales a base de la regulación diaria o semanal, en concordancia con las variaciones de carga del sistema. De este modo, la descarga de una central de este tipo con relación a otra sin regulación de caudal puede llegar a ser doblada, como puede verse en el ejemplo de cálculo del anexo 4.3, y en el correspondiente gráfico 4.5, figura 1.

Las centrales con almacenamiento para regulación diaria o semanal pueden tomar generalmente la carga de base en las épocas de abundancia de lluvias, pues se puede obtener la potencia máxima de salida con un factor de carga cercano a la unidad, aprovechando el exceso de caudal existente con respecto al caudal firme que de otro modo se desperdicia. En este tipo de centrales las obras de contención son normalmente presas que embalsan el agua formando los depósitos compensadores, o en caso de ser del tipo de centrales con obras de contención y vía de agua, están provistas de un pequeño almacenamiento para regulación diaria situado en el medio de la vía de agua, entre la toma y la casa de máquinas; característica que presenta la ventaja de permitir la construcción de la primera parte de la vía de agua (canal o túnel) solamente para el gasto medio de la central y no para el máximo como ocurriría de hacerse la compensación con el propio embalse.

Centrales con reservorio de regulación. Este tipo de centra-

Gráfico 4.5

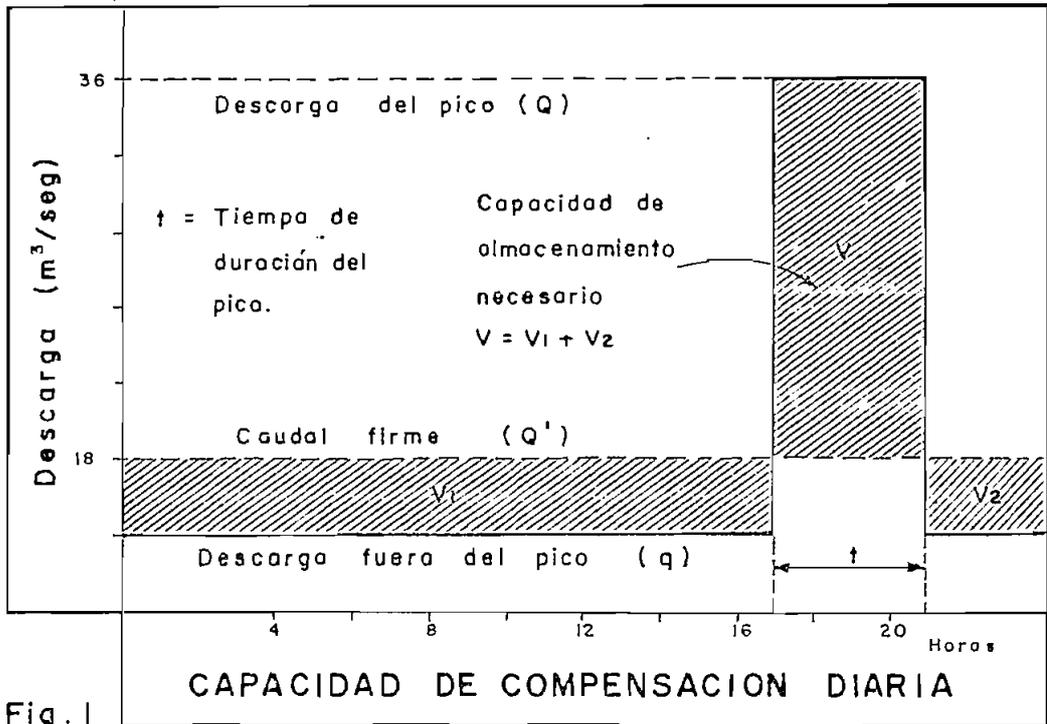


Fig. 1

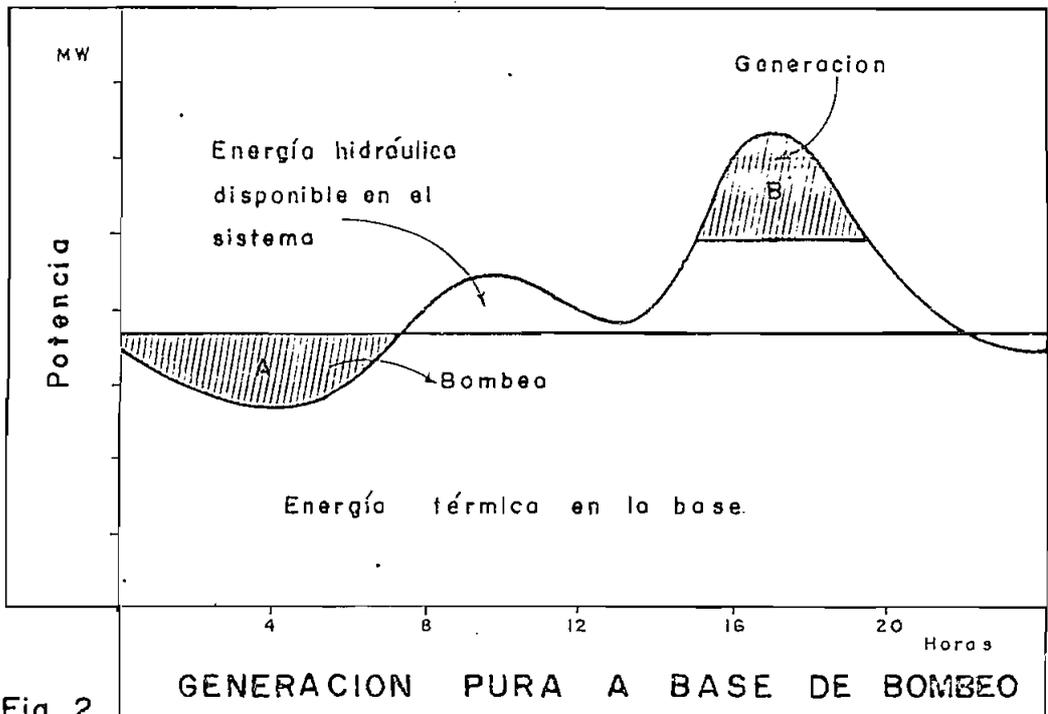


Fig. 2

les cuenta con suficiente capacidad de almacenamiento para controlar la descarga de la central en concordancia con los programas de operación del reservorio, permitiendo la regulación anual o estacional de los caudales. La potencia de salida de estas centrales depende de la forma de operación para la cual fue diseñada y de su participación en la carga del sistema, - pudiendo llegar a multiplicar la potencia del caudal firme dependiendo del valor adoptado para la descarga y de la capacidad de almacenamiento, según ya fue analizado anteriormente.

Centrales de almacenamiento por bombeo. Este tipo de centrales bombea desde un depósito inferior en el que se ha acumulado el agua usada previamente en la generación de la misma - planta, hasta un depósito superior que actúa como resérvorio de regulación. El bombeo se realiza a base de la energía producida por otras plantas hidráulicas en épocas de agua abundante, o por plantas térmicas en horas de baja carga; en tanto que el agua así almacenada es usada en las temporadas de estiaje o en las horas de pico según el caso. Existen tres tipos conocidos de esta clase de instalaciones;

a) Tipo de circulación. El agua circula entre los depósitos superior e inferior que tienen aproximadamente la misma capacidad, una y otra vez, sin necesidad de que exista un curso de agua que los alimente sino en una pequeña cantidad que supla las pérdidas y que puede afluir a cualquiera de los dos estanques. Este procedimiento es factible en los sistemas -

que operan con base térmica y que cuentan con potencia en exceso en las noches o en los períodos de lluvias, suficiente para suministrar la anergia del bombeo en condiciones de eficiencia. Si se toma la curva de carga diaria de un sistema, como la indicada en el gráfico 4.5, figura 2, se puede apreciar el proceso en el que se distinguen:

A = Exceso de energía térmica usada en el bombeo, y

B = Generación con agua almacenada por bombeo.

b) Tipo de uso múltiple. Este se diferencia del anterior en que hace uso de un reservorio construido con finalidad múltiple de uso del agua y al cual afluye un curso que lo alimenta. A la capacidad de generación propia de la utilización del río se suma entonces el volumen acumulado mediante bombeo en las mismas condiciones que para el caso de circulación. El estanque inferior tiene la finalidad de almacenar el agua que ha servido para generación hasta el momento de ser bombeada al estanque superior.

c) Tipo de desviación. Se diseña en los casos de tener solamente una pequeña caída disponible para ser usada en una central que trabaje durante el día a base de la utilización del caudal firme proveniente de un río. El agua usada en la generación se almacena y se bombea durante la noche al reservorio superior de donde se desvía hacia otra cuenca en la que se dispone de una caída mayor. De este modo se ha utilizado el

caudal disponible una vez y vuelve a ser usado en una caída superior otra vez.

Máxima descarga y máxima capacidad. La solución al problema de decidir la relación entre el caudal firme y la descarga máxima con que ha de operar una central durante las horas del día depende de las características específicas y los propósitos de la utilización. En los casos de centrales a circulación natural o centrales con regulación diaria se toma de referencia, como ya se mencionó, el caudal disponible durante 25 días al mes, siendo el valor promedio o el valor mínimo de los valores mensuales registrados durante el año el valor de caudal firme considerado para esa planta. En las centrales con reservorio de regulación el valor del caudal firme se obtiene de las curvas de volúmenes acumulados o escurrimientos, y puede ser el valor mínimo anual de los valores que se encuentren en los registros históricos, u otro, de acuerdo al análisis del almacenamiento que se hace en la forma indicada anteriormente.

La descarga máxima, estando condicionada al caudal disponible en la utilización, dependerá de la ubicación de la planta en la carga de pico, en la zona de cargas medias o en la carga de base, lo cual determinará a su vez el monto de carga que esa planta tome del sistema y su tiempo de operación. Teniendo en cuenta estos factores se considerará

entonces como máxima descarga de la planta el máximo posible valor que puede alcanzar la descarga usando el caudal firme de la utilización, en relación con la duración de la carga máxima aplicada a esa planta.

Tratándose de una central diseñada para trabajar en el pico del sistema solo unas horas al día, la máxima descarga estará dada por la siguiente relación:

$$Q_{\max} = q \cdot \frac{24}{T}$$

en la cual,  $q$  representa el caudal firme y  $T$  la duración del pico que para este caso es el tiempo de operación de esa planta.

En general, la potencia de salida de una planta hidráulica tiene dependencia directa, aunque no lineal, de la descarga de las turbinas; por lo tanto, la máxima capacidad de una central estará determinada por su descarga máxima de diseño. La ecuación fundamental para el cálculo de la potencia de salida de una planta demuestra la dependencia de ésta con la descarga:

$$P = 9,8 \cdot Y_1 \cdot Y_2 \cdot Q \cdot H$$

en donde,

$P$  = Potencia (KW)

Y1 y Y2 = Eficiencia de la turbina y el generador (%)

Q = Descarga (m<sup>3</sup>/seg)

H = Caída neta de la utilización (Mts)

Cuando en esa ecuación Q sea igual a la descarga máxima, P será igual a la máxima capacidad. Además, la caída neta o efectiva corresponde a la diferencia de las pérdidas en la captación y en la conducción del agua con respecto a la caída bruta, siendo esas pérdidas indicativas de la reducción de carga en diferentes puntos de la vía de agua.

La eficiencia en la turbina (Y1) y en el generador (Y2) varían de acuerdo con el tipo de maquinaria, con la caída y con la descarga. Sin embargo, para un cálculo en primera aproximación puede considerarse una eficiencia combinada de 0,75 a 0,85 para grupos turbina generador que estén por debajo de 10 MW o por sobre 50 MW respectivamente.

#### Energía disponible anualmente.

Se entiende por energía disponible en una planta eléctrica la energía que la planta puede producir a lo largo del año haciendo abstracción de las características de la demanda, del factor de carga o de las salidas de servicio por daños o mantenimiento.

Para el cálculo de la energía disponible tiene impor-

tancia el valor promedial diario de la descarga anual, el mismo que se determina a base de las curvas de duración de los caudales o de las curvas de volúmenes acumulados. El valor promedio de descarga determinado, relacionado con la caída neta de la utilización, equivale a la potencia de salida promedial de la planta. Entonces, la energía disponible anualmente está dada por la ecuación:

$$E = 8.760 f \cdot P_o$$

en donde,  $f$  es el factor de utilización y  $P_o$  la potencia promedial.

#### 4.4. CARACTERISTICAS DE LAS CENTRALES

De acuerdo a la forma de utilización de la caída las centrales pueden clasificarse en los siguientes tipos generales:

Centrales a circulación natural. Estas centrales no están provistas de obras de contención de los ríos y por lo mismo no cuentan con embalses que puedan almacenar el agua. El caudal es captado directamente del curso mediante obras llamadas presisamente de captación o de toma, quedando el remanente libre de circular por el mismo cauce.

Este tipo es usado comunmente cuando el río tiene una aceptable duración de la descarga y una gradiente empinada y muchos recodos (ríos de montaña), tal que pueda obtenerse una apreciable caída ( $H$ ) con una comparablemente corta vía de agua (canal o túnel). Se acepta generalmente que la relación mí-

nima que debe existir entre  $H$  y la longitud de la vía de agua ( $L$ ) para este tipo de utilizaciones sea de  $1/200$ , lo que quiere decir que para conseguir un metro de caída la longitud de la vía de agua no debe ser mayor de 200 metros. El gráfico 4.6, figura 1, indica un esquema de este tipo muy conocido de centrales.

Centrales con obras de contención. Estas centrales están provistas de diques o presas que permiten embalsar el agua, almacenándola cuando no se la necesita para ser usada cuando si se la necesita, y principalmente permitiendo una elevación de la altura del nivel del agua en el embalse, lo que produce una caída sin necesidad de vía de agua que puede ser usada directamente al pie de la obra de contención.

Este tipo de utilización se adopta cuando el cauce tiene solo pequeña gradiente que no puede ser aprovechada económicamente y cuando exista un sitio favorable para la localización de la presa. Pueden estas centrales ser además parte de una utilización múltiple del río con lo cual se aprovecha también la caída extra producida por estos otros usos permitiéndolo una sobre capacidad de almacenamiento en las épocas de crecientes que puede ser usada en las épocas de sequía. Su esquema está dado en el mismo gráfico, figura 2.

Tipo combinado. Este tipo de centrales reúne las características favorables de los dos tipos anteriores, permitiendo una combinación ventajosa desde el punto de vista de aprovechamiento hidroeléctrico, pues a la elevación del nivel y capacida-

Gráfico 4.6

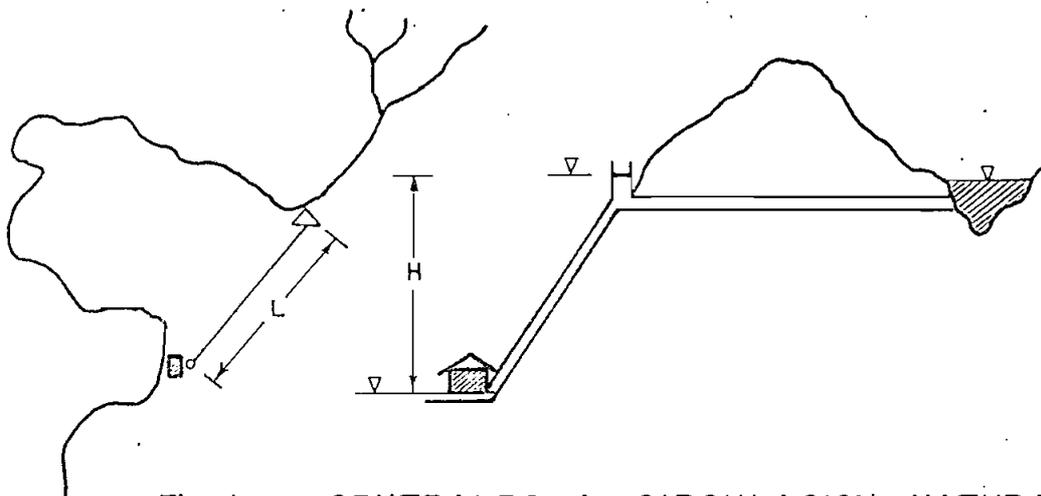


Fig. 1 CENTRALES A CIRCULACION NATURAL

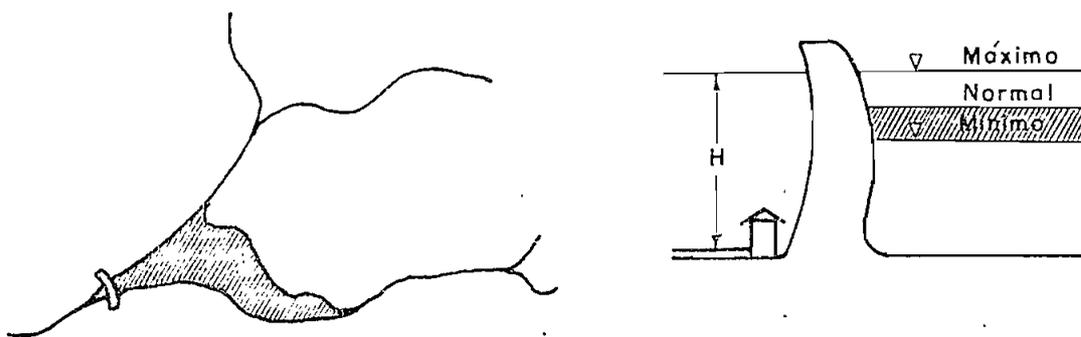


Fig. 2 CENTRALES CON OBRAS DE CONTENCION

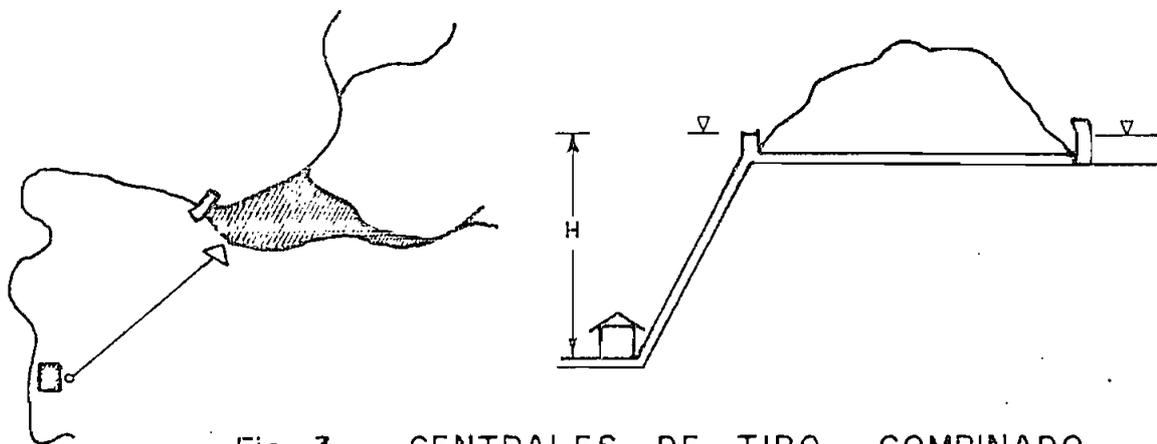


Fig. 3 CENTRALES DE TIPO COMBINADO

des de almacenamiento y regulación que permite el embalse, se suma la caída que se puede conseguir cuando aguas abajo del dique - se tiene una apreciable gradiente que facilite la localización de una vía de agua. La figura 3 presenta un esquema de este tipo de centrales.

Instalaciones componentes de las centrales. Entre el sitio de captación del agua y el sitio de su utilización en la central generadora o casa de máquinas existen numerosas e importantes instalaciones que conducen el agua formando una cadena que puede ser muy simple o muy compleja de acuerdo a la concepción misma del proyecto y a las condiciones físicas del terreno en donde se sitúan dichas instalaciones.

Todas las instalaciones siguientes o una parte de ellas forman la utilización;

- a) Bocatoma
- b) Vía de carga que puede ser canal abierto, túnel a nivel libre o túnel bajo presión.
- c) Depósito desarenador
- d) Depósito de compensación
- e) Tanque o cámara de equilibrio
- f) Tubería de presión
- g) Casa de máquinas
- h) Vía de descarga que también puede ser canal o túnel.

Estos elementos mantienen una inter-relación muy estrecha entre sí por lo que las características de uno de ellos

estarán condicionadas no solamente a los lineamientos generales del proyecto sino a las características de diseño de los elementos vecinos. Esta condición especial que exige una concepción global del proyecto y que ocasiona variaciones de diseño y aún de criterio conforme se va desarrollando el estudio, se puede apreciar al analizar las características sobresalientes de cada uno de estos elementos.

1) Vías de carga y descarga. El tipo escogido para las vías de carga y descarga, así como sus rutas y elevaciones, son factores determinantes de la localización del resto de estructuras y pueden tener incidencia notable en la economía del proyecto, aún cuando el costo de éstas no siempre es tan alto como el de la casa de máquinas por ejemplo.

Cuando la caída de la utilización está dada como una condición del proyecto, la más económica localización de las vías de carga y descarga es aquella que determine su menor longitud expresada en términos de igualdad de volúmenes o pesos de excavación. De esta manera, además de que los costos de construcción totales serán probablemente menores, se tendrán durante la operación un mínimo de pérdidas de carga por rozamiento.

Otro factor que da mucha flexibilidad a la ubicación de las vías de agua es el progreso en la técnica de construcción de centrales generadoras de tipo subterráneo, lo cual ha permitido obviar las dificultades que pueden presentar terrenos difíciles cuando la ubicación de éstas depende de factores ajenos a sus propias -

conveniencias técnicas, siendo por lo tanto posible, diseñar casas de máquinas en forma económica en cualquier lugar que vayan a ser ubicadas como consecuencia de la localización de las otras instalaciones. Esta circunstancia permite que la ruta y eleva - ción de las vías de agua (ejes) se fijen en primer lugar, quedando la ubicación de la casa de máquinas determinada en el mismo eje. En este caso, factores de importancia secundaria como el tipo de la casa de máquinas que se va a usar o la ubicación del patio de maniobras o la subestación no se han tenido en cuenta todavía.

Los costos de construcción de las vías de agua cuando se tratan de túneles bajo presión son usualmente más al - tos que los de los túneles a nivel libre. Además, en caso de túneles bajo presión se requiere a menudo la dotación de tanque de equilibrio para contrarrestar los fenómenos hidráulicos transitorios. Es usual por otro lado que estos túneles se construyan con hormigón reforzado, aparte de que puede haber necesidad de la aplicación de inyecciones de cemento alrededor del túnel, lo cual encarece su costo.

2) Tubería de presión. En general, el costo de construcción de la tubería de presión es más alto que el de un canal de descarga y aún que el de un túnel de gran sección, a pesar de que muchas veces es necesario excavar el cauce natural que forma parte del canal de descarga con el fin de bajar su nivel. Además, conforme se incrementa la longitud de la tubería de presión, la sobrepresión causada por el golpe de ariete irá en aumento, ocasionando la necesidad de elevar el propio peso de la tubería y de mayorar el e

fecto volante ( $GD^2$ ) de la unidad turbina generador, subiendo por consiguiente el costo de construcción del proyecto.

Por lo tanto, es generalmente mas ventajoso - que la vía de descarga se diseñe más larga y la tubería de pre si ón más corta. Sin embargo, esta afirmación no es tan definitiva, cuando la naturaleza de la roca del lecho de la tubería de presión es tan buena que permita soportar total o parcialmente la presión de la tubería. Cuando la vía de agua en general es corta, resulta ventajoso independizar completamente las vías de agua para cada unidad de generación, con lo cual se evitan las bifurcaciones existentes en las tuberías de presión madres y puede eliminarse inclusive la válvula de entrada a la turbina. Por el contrario, cuando el caudal es grande y la vía de agua relativamente larga, la tubería será ramificada al final para servir a varias unidades y en este caso, es conveniente situar la elevación de la bifurcación lo más alta posible a fin de re ducir el esfuerzo en las tuberías.

3) Central generadora. Cuando se diseña la casa de máquinas pa ra ser construída junto al dique o junto a otra estructura im portante, se lo hace en conexión con un importante efecto eco nómico del proyecto, toda vez que deben afrontarse complicados problemas en la inter-relación del control durante la etapa de construcción. Soluciones de esta naturaleza, con ser tan deli cad as permiten la ejecución de obras que de otro modo pueden no ser factibles de llevarse a la práctica. A continuación se oi tan algunos ejemplos de este caso y otras construcciones combi nadas que pueden tener un efecto determinante en los costos to

tales del proyecto.

- a) La casa de máquinas se construye bajo la escarpa de una presa de gravedad.
- b) La casa de máquinas se construye bajo el canal de desfogue del aliviadero del reservorio.
- c) La cara de aguas arriba del dique sirve para instalar las obras de captación o toma.
- d) El túnel de desvío usado en la construcción es usado como -vía de descarga o cámara de equilibrio de la descarga.
- e) El sitio de desbanque de los materiales para la construcción se usa para ubicar el patio de maniobras o la subestación.

La decisión de construir una central generadora subterránea o a nivel del suelo dependerá de diversos factores particulares del proyecto que determinan que un tipo sea más ventajoso que otro. En general, las centrales subterráneas tienen notables ventajas con respecto a las que se construyen en la superficie, pero tienen en su contra el alto costo de construcción; sin embargo, bajo ciertas circunstancias los costos de construcción pueden ser reducidos volviéndolas preferenciales. Por ejemplo, una central subterránea puede ser más -conveniente que una central superficial cuando se trate de una utilización de gran caída, pues las turbinas necesitan menos -espacio de instalación y menor separación entre ellas que las turbinas para una caída menor, dando como resultado un área de construcción relativamente más pequeña que permite aplicar la construcción subterránea con ventaja. Igualmente tratándose -de una central con unidades de gran capacidad, pueden encontrar

se mejores condiciones en la construcción subterránea ya que el costo unitario de construcción de los túneles de cables o de acceso es menor por razón de su alta potencia. Además, por este mismo concepto se reduce el costo unitario de la vía de agua ofreciendo una ventaja adicional. Por último, resultará ventajo sa la construcción de las centrales subterráneas cuando tengan varias unidades, pues el area de ensamblaje correspondiente a cada unidad será porcentualmente menor.

Sin embargo de estas consideraciones que abonan en favor de la adopción de las casas de máquinas de tipo subterráneo, para decidir su construcción habrá que hacer un balance de los trabajos que demanda el proyecto total en relación con este tipo de construcción, de modo que la selección de la casa de máquinas sea el resultado lógico del análisis del conjunto. A continuación se citan algunos ejemplos de casos en que puede ser adoptada la construcción ~~de~~ una casa de máquinas subterránea.

- a) Cuando el costo de construcción de la vía de agua se reduzca considerablemente.
- b) Cuando el caudal de avenida sea tan grande que el nivel en la descarga resulte peligroso para las instalaciones exteriores.
- c) Cuando una instalación superficial corra peligro de sufrir el efecto de deslizamientos de tierras, avalanchas o no exista espacio adecuado en el exterior.
- d) Cuando se requiere sumersión de las turbinas en caso de ope-

ración combinada con bombeo, pues se consigue más fácilmente poner la casa de máquinas más baja que la salida de la descarga que en los casos de centrales superficiales.

- e) Cuando el material del subsuelo sea de tan buena calidad que permita eliminar las estructuras circundantes de la casa de máquinas que normalmente se usan en los tipos de superficie.

#### 4.5. Valoración económica de las plantas hidráulicas.

El análisis de la factibilidad económica de un proyecto hidroeléctrico se basa en la comparación de los costos que demanda el proyecto propuesto con respecto a los costos que demandaría la instalación de una central térmica básica de capacidad equivalente. La idea de tomar como modelo de comparación una planta térmica básica se fundamenta en la presunción de que ésta puede sustituir a cualquier forma de producción de energía hidráulica en condiciones económicas similares, si se convierten los costos anuales de operación en valores presentes para obviar la diferencia de duración de las instalaciones que producen una y otra forma de energía, y si se sitúa la energía producida por las dos diferentes fuentes en el mismo punto del sistema.

Para evaluar dicha factibilidad económica se emplea el factor conocido como " $C/V$ ", en el que " $C$ " representa el costo del proyecto hidroeléctrico propuesto y comprende la inversión, los costos de operación y mantenimiento y los costos de transmisión inclusive las pérdidas; en tanto que " $V$ " es el

costo de operación tipo de una planta térmica de capacidad comparable a la de la planta hidráulica propuesta e incluye los costos de instalación y los costos de operación y mantenimiento

El valor que toma la relación de los valores C y V que se calculen indicará el grado de factibilidad económica del proyecto. Mientras menor sea el factor C/V, mayor será el mérito del proyecto hidroeléctrico propuesto, en términos económicos.

Examinando el contenido de C y de V se tiene lo siguiente:

$$1) V = V1 + V2$$

en donde,

V = Costo promedio anual de operación de la planta térmica básica.

V1 = Valor del Kw instalado (Costos fijos)

V2 = Valor del Kwh producido (Costos variables)

$$2) C = C1 + C2 + C3$$

en donde,

C = Costo promedio anual de operación de la planta hidráulica

C1 = Costo de capital

C2 = Costo de operación y mantenimiento

C3 = Costo de la transmisión.

La información que se toma para el cálculo del costo de operación de la planta térmica debe ser representativa de una planta que esté en condiciones de construirse en un futuro

ro inmediato, pues esto tiene relación con la vida promedio de la planta, el costo del combustible y la eficiencia, factores cambiantes todos estos con el mejoramiento de la técnica. Con respecto al factor de utilización se considera que ha de variar año a año dependiendo de la adición de nuevas plantas al sistema, por lo que debe tomarse el factor de utilización de la vida promedio de la planta.

Al determinar el costo anual de operación de la planta hidráulica deberá tenerse en cuenta el costo promedio durante su vida útil, que corresponde al cómputo de la vida de los componentes de la misma.

En ambos casos, para la planta térmica como para la hidráulica, los costos de inversión o costos de capital se convierten a costos anuales promedios teniendo en cuenta el costo promedio para la vida útil de cada una de las plantas. La forma de calcular los costos anuales es usando el factor de recuperación de capitales basado en el valor residual, dado por la siguiente fórmula:

$$v = (1 - s) \frac{i (1 - i)^n}{(1 - i)^n - 1} + si$$

en donde,

v = Factor de recuperación de capital

s = Valor residual

i = Tasa de interés

n = Vida útil en años

Conociendo este factor puede calcularse el valor de la depreciación más los intereses del capital invertido, mediante la siguiente igualdad:

$$P_1 = v \cdot A_t$$

en donde,

$A_t$  = Costo de construcción por Kw.

En base a  $P_1$  se buscan los costos fijos totales, por Kw, en los terminales de generación ( $P_g$ ):

$$P_g = P_1 + P_2$$

en donde,

$P_2$  = Costos de operación, mantenimiento, gastos administrativos imputables, impuestos, etc, convertidos a valores promedio anuales por Kw.

En este punto intervienen los costos de transmisión así como los costos provenientes de las pérdidas en las líneas y del consumo propio de la estación, y como en el caso de la central, el valor a usarse es el promedio anual para la vida útil de las instalaciones de transmisión. Por lo tanto, los costos fijos por Kw en los terminales de transmisión valdrán:

$$P_s = P_g / (1 - Y_1) (1 - Y_2) + P_t$$

en donde,

$Y_1$  = Factor de pérdidas en la transmisión

$Y_2$  = Factor de consumo de la estación

$P_t$  = Costo de la transmisión por Kw

Es de notar que en el caso de la central térmica puede no existir costo relativo a la transmisión, pero en

cambio habrá que incluir un nuevo factor (m) que tiene que ver con las interrupciones debidas a mal funcionamiento e inspecciones de mantenimiento, más frecuentes en éstas que en las plantas hidráulicas, con lo cual, los costos fijos tomarían el valor:

$$P = (1 + m) \cdot P_s$$

En cuanto a los costos variables que afectan a las plantas térmicas, su valor por Kwh estará dado por la siguiente ecuación:

$$q = (q_s + q_m) / (1 - Y_1) (1 - Y_2)$$

en donde,

$q_s$  = Costo del combustible por Kwh

$q_m$  = Otros costos variables como reparaciones, lubricantes, etc.

Los costos fijos totales y los costos variables totales de una planta térmica básica que tenga una capacidad comparable a la de la propuesta planta hidráulica, se obtienen multiplicando la potencia efectiva ( $P_e$ ) y la energía efectiva ( $E_e$ ) del proyecto con los valores unitarios respectivos ya calculados:

$$V_1 = P \cdot P_e$$

$$V_2 = q \cdot E_e$$

Los valores de C y V determinados de esta forma servirán para llegar al factor C/V buscado.

ANEXO 4.1.

Ejemplo de cálculo de la eficiencia de un reservorio.

1) Características relativas al curso de agua

$$\text{Caudal medio anual} = 6 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$\begin{aligned} \text{Escorrentamiento} &= 6 \text{ m}^3/\text{seg} \times 365 \text{ días} \\ &= 2.190 \text{ (m}^3/\text{seg).día} \\ &= 2.190 \text{ m}^3/\text{seg} \times 86.400 \text{ seg} \\ &= 189 \times 10^6 \text{ m}^3. \end{aligned}$$

2) Características relativas al almacenamiento

$$\begin{aligned} \text{Capacidad efectiva} &= 32 \times 10^6 \text{ m}^3 \\ &= 32 \times 10^6 \text{ m}^3 \times 1 \text{ día}/86.400 \text{ seg} \\ &= 370 \text{ (m}^3/\text{seg).día.} \end{aligned}$$

3) Factores que determina la eficiencia

$$\text{Relación de regulación} = 32 \times 10^6 \text{ m}^3 / 189 \times 10^6 \text{ m}^3 = 17\%$$

$$\text{Relación de relleno} = 10 \text{ m}^3/\text{seg} / 6 \text{ m}^3/\text{seg} = 167 \%$$

$$\text{Duración del relleno} = 370 \text{ (m}^3/\text{seg).día} / 10 \text{ m}^3/\text{seg} = 37 \text{ días}$$

Nota: Descarga máxima del reservorio = 10 m<sup>3</sup>/seg

ANEXO 4.2. (a)

Cálculo del volumen de almacenamiento para un reservorio con  
descarga variable por periodos mensuales.

a) Regulación con la descarga media anual, (6,5 m<sup>3</sup>/seg).

Mes	.Caudal re- gistrado (m <sup>3</sup> /seg).día	.Caudal me- nos descarga (m <sup>3</sup> /seg).día	.Volumen de al- macenamiento (m <sup>3</sup> /seg).día
1	180	-15	-15
2	223	28	13
3	226	31	44
4	361	166	210
5	238	43	253
6	347	142	395
7	218	23	<u>418</u>
8	106	-89	329
9	101	-94	235
10	73	-122	113
11	75	-120	-7
12	197	2	-5
Total	2.345 (m <sup>3</sup> /seg.día)		

ANEXO 4.2. (b)

Cálculo del volumen de almacenamiento para un reservorio con descargas variables por períodos mensuales.

b) Regulación con descarga variable.

.Mes	.Valor de la descarga (m <sup>3</sup> /seg).día	.Caudal me- nos descarga (m <sup>3</sup> /seg).día	.Volumen de almacenamiento (m <sup>3</sup> /seg).día
1	148	32	32
2	175	48	80
3	170	56	136
4	176	185	<u>321</u>
5	298	-60	261
6	288	59	320
7	218	0	320
8	178	-72	248
9	184	-83	165
10	184	-111	54
11	165	-90	-36
12	153	44	8
Total	2.337 (m <sup>3</sup> /seg.día)		

ANEXO 4.3.

Determinación del volumen de almacenamiento en un depósito de compensación diaria.

La capacidad de almacenamiento necesaria para compensación diaria está determinada por el tiempo de duración de la carga de pico, el que toma diferentes valores de acuerdo a las características del sistema.

A base de la curva de carga aproximada a una forma rectangular, como la indicada en la figura 1 del gráfico 4.5, se puede calcular el volumen de almacenamiento para una utilización con las siguientes características:

Descarga de pico (Q), 36 m<sup>3</sup>/seg

Caudal firme (Q'), 18 m<sup>3</sup>/seg

Tiempo de duración del pico (t), 4 horas

El volumen de agua que se deja de usar en las horas fuera de pico, con relación al caudal firme, se lo usa en las horas de pico aumentando la potencia de salida de la utilización. Por tanto, el volumen de agua acumulada o la capacidad de almacenamiento esta dado por:

$$V = 3.600 (Q - Q') \cdot t$$

Y para los datos del ejemplo

$$V = 260.000 \text{ m}^3$$

## CAPITULO V BASES Y CRITERIOS PARA EL DISEÑO

### 5.1. OBRAS DE CONTENCIÓN Y SEGURIDAD

: Las obras de contención que se practican en los cauces de los ríos sujetos a un aprovechamiento hidráulico tienen la finalidad de detener las aguas, sobreelevar su nivel y permitir su captación. Cuando las obras de contención sirven solamente para garantizar un nivel mínimo, tal que permita captar el volumen necesario para la utilización, se está en presencia de los azudes. Pero cuando además se crea un depósito de acumulación de gran capacidad y la sobreelevación del nivel del agua en el cauce produce un salto hidráulico aprovechable, se tienen las presas de embalse o diques.

#### a) Azudes.

Un azud es un obstáculo que se ubica en el cauce y se opone al curso de agua produciendo un remansamiento y la consecuente elevación del nivel, pudiendo el agua pasar por el sitio dispuesto para el objeto y en la cantidad deseada de acuerdo al tipo de azud que se emplee. La ubicación del azud permite la derivación de las aguas hacia la utilización en una cantidad prefijada que generalmente garantiza un flujo constante aún en las épocas de sequía.

Los azudes pueden ser de tipo fijo, hechos de hormigón o mampostería, o de tipo móvil, hechos de madera y hie

rro combinados, en cuyo caso se los conoce simplemente como compuertas. Los azudes fijos permiten el paso del agua por su parte superior a base del desborde del líquido, en tanto que los azudes móviles pueden levantarse o abatirse sobre el cauce dejando libre circulación del agua. Esta última característica es favorable por que evita la sedimentación en el pié del azud de los materiales acarreados por el río como ocurre en los de tipo fijo.

El caudal que se desvía para la utilización (Qd) será menor o a lo más igual que el caudal mínimo del río (Qm), quedando para circular por el azud el caudal que no va a ser utilizado (Q), el mismo que está dado por la igualdad:

$$Q = Qm - Qd$$

Puede darse el caso desde luego, de que más allá del sitio de captación del caudal exista un depósito de compensación, en cuyo caso el caudal Qd no será necesariamente menor que Qm, dando lugar a que en ciertas temporadas no circule agua a través del azud.

El dimensionamiento de los azudes se reducirá a la determinación del rango de variación de los caudales del curso de agua y consecuentemente de las diferentes condiciones de carga que produce el remansamiento sobre la abertura del azud. Entonces, el caudal que debe pasar por el azud en cada condición puede ser determinado a base de las fórmulas generales para el cálculo de la desembocadura de un torrente en un orificio

de grandes dimensiones, el mismo que para el caso del azud de compuerta está totalmente sumergido y para el caso de azud fijo es un vertedero con el lado superior abierto y coincidente con el nivel libre del líquido.

Existen además construcciones especiales de azudes que pueden tener las obras de captación del caudal desviado formando parte del propio cuerpo del azud. Tal es el caso de los azudes "de sifón" y "tirolés", cuyo uso tiene ciertas restricciones en los cauces amplios y de caudales muy variables.

b) Presas de material suelto

Con este nombre se conocen en forma general a las presas de tierra y a las presas de escollera o de rocas sueltas, las mismas que se construyen a base de tierra, arena, grava o fragmentos de roca disponibles en los sitios de los proyectos o cercanos a ellos.

La razón fundamental para la adopción de este tipo de presas radica en la economía, aparte de la seguridad que ofrecen aún en sitios de características pobres para la cimentación, pues las cargas producidas por la presión del agua y por el propio peso de la presa se distribuyen en una superficie de fundamento más amplia que para los otros tipos. Consecuentemente, casi no existen restricciones en cuanto a la selección del sitio para su instalación.

Como las características de diseño de estas presas están frecuentemente condicionadas a las propiedades de los materiales que se van a usar en el embanque, y estos varían ampliamente de acuerdo a su origen, no puede hablarse de un modelo general o un tipo para su diseño. Por esta misma razón, los materiales que usualmente se obtienen en el propio sitio del proyecto deben ser cuidadosamente investigados con el fin de conocer ciertamente sus características, pues todos los materiales disponibles han de usarse, sin que existan prácticamente materiales de desecho,, y de éstos depende el sistema de construcción que se emplee para la presa.

Otro punto importante que debe ser considerado al adoptar este tipo de presas es su vulnerabilidad ante los desbordes de los embalses que pueden causar las crecientes, lo que limita en cierto modo su aplicación en los casos de condiciones severas de crecientes o cuando los aliviaderos no pueden ser diseñados económicamente.

#### 1) Tipos de presas.

De acuerdo a la forma en que están distribuidos los materiales del embanque en las presas de material suelto se pueden distinguir los siguientes tipos:

##### Presa homogénea. (Gráfico 5-1, figura 1)

Las presas homogéneas toman este nombre porque todo o casi todo el embanque está hecho de una sola clase de material, fre -

# Gráfico 5.1

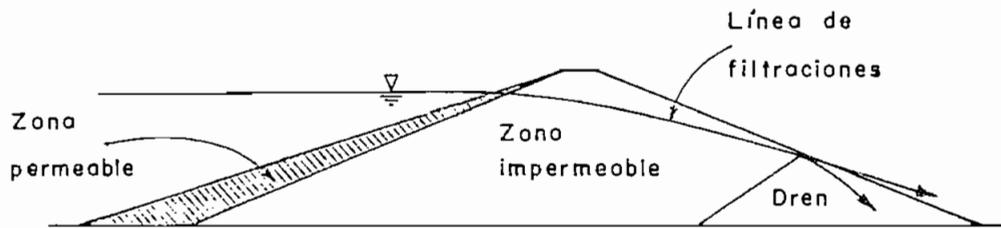


Fig. 1 PRESA HOMOGENEA

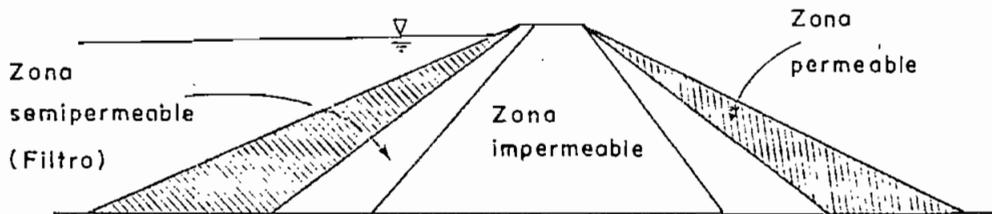


Fig. 2 PRESA ZONIFICADA

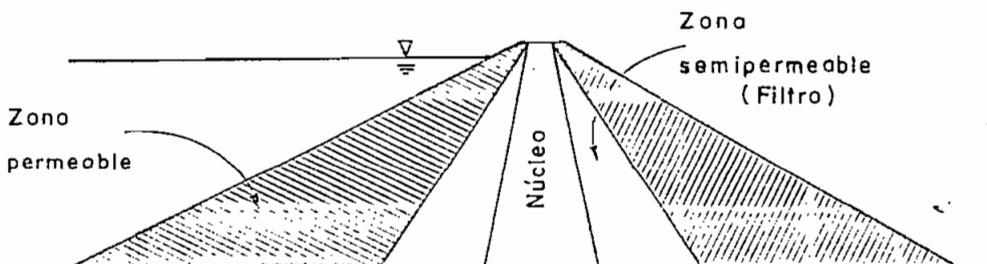


Fig. 3 PRESA DE NUCLEO CENTRAL

PRESAS DE MATERIAL SUELTO

cuentamente material impermeable de baja resistencia al corte, razón por la que no suele adoptarse este tipo cuando se requieren presas de gran altura. Por esa misma causa las pendientes de los paramentos tanto de aire como de agua son suaves.

La ventaja de esta clase de presas radica en su relativamente sencillo proceso de construcción, comparado con los otros tipos, a pesar de que debido a la calidad de los materiales que se emplean es necesario dotarlas de un sistema especial de drenaje. La función del drenaje es reducir la presión de porosidad y atenuar la línea de filtraciones a fin de evitar que el agua que circula por el interior de la presa llegue al paramento de aire produciéndose un escape libre y la consecuente descomposición de los materiales.

En el area de drenaje se usan materiales de mayor permeabilidad que los usados en el resto del embanque con el fin de captar fácilmente las filtraciones y conducir las al exterior en forma segura.

#### Presa zonificada. (Gráfico 5.1, figura 2)

Estas presas se componen de varias zonas de diferente permeabilidad. El espesor de la zona impermeable es suficientemente grande todavía, por lo que no se requiere una estricta selección de los materiales a usarse.

Comparándola con la presa homogénea los paramentos de ésta son de pendiente más fuerte, lo que permite un

menor volumen de embancamiento para una misma altura, pues en el embanque se usan mayor cantidad de materiales permeables de alta resistencia al corte.

Presa de núcleo central. (Gráfico 5.1, figura 3)

Este tipo de presas tiene la misma distribución de zonas que el tipo anterior, pero se diferencia en que la sección ocupada por los materiales impermeables es de área reducida formando un verdadero núcleo, de donde toma el nombre la presa.

Este tipo de construcción ofrece la ventaja de poder usar una mayor cantidad de materiales permeables y consecuentemente dar una mayor gradiente a los dos paramentos, lo que finalmente significa un menor volumen de embanque que en los tipos anteriores. Además, debido al reducido espesor del núcleo existe facilidad para la disipación de la presión de porosidad, por lo que pueden emplearse extensivamente materiales con alto contenido natural de humedad. Por último, este tipo de construcción puede ser satisfactoriamente empleado en localidades con severas condiciones de clima, pues el mal tiempo tiene poca influencia en el embancamiento de los materiales impermeables, dando lugar a un aumento en los días de trabajo aún bajo lluvia y a una reducción del período de construcción.

Presa de núcleo inclinado. (Gráfico 5.2, figura 1)

Esta presa se diferencia de la anterior en la localización del núcleo. Tiene la misma zonificación pero el núcleo se halla

## Gráfico 5.2

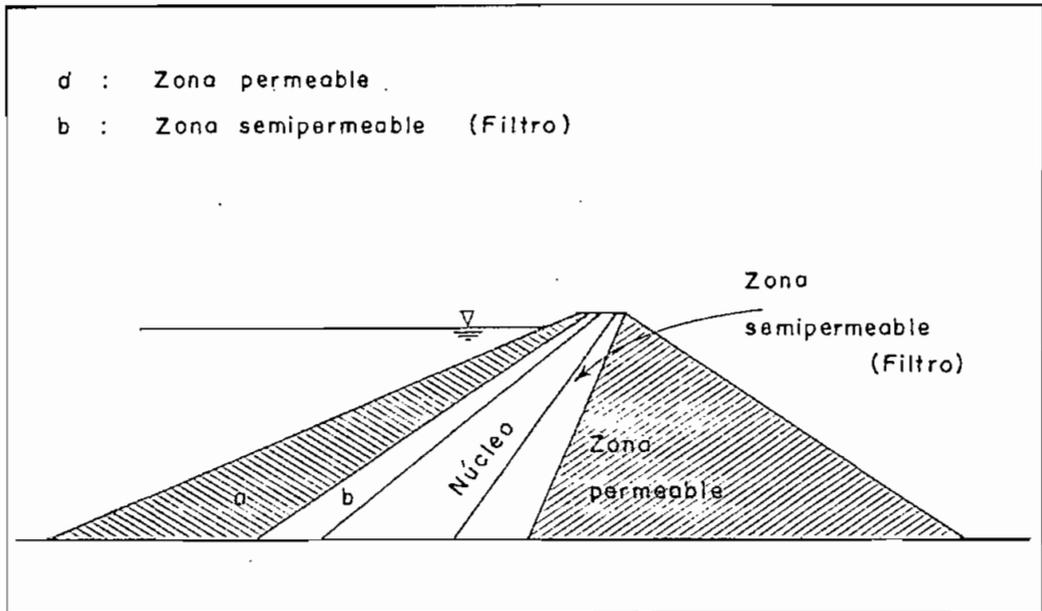


Fig. 1 PRESA DE NUCLEO INCLINADO

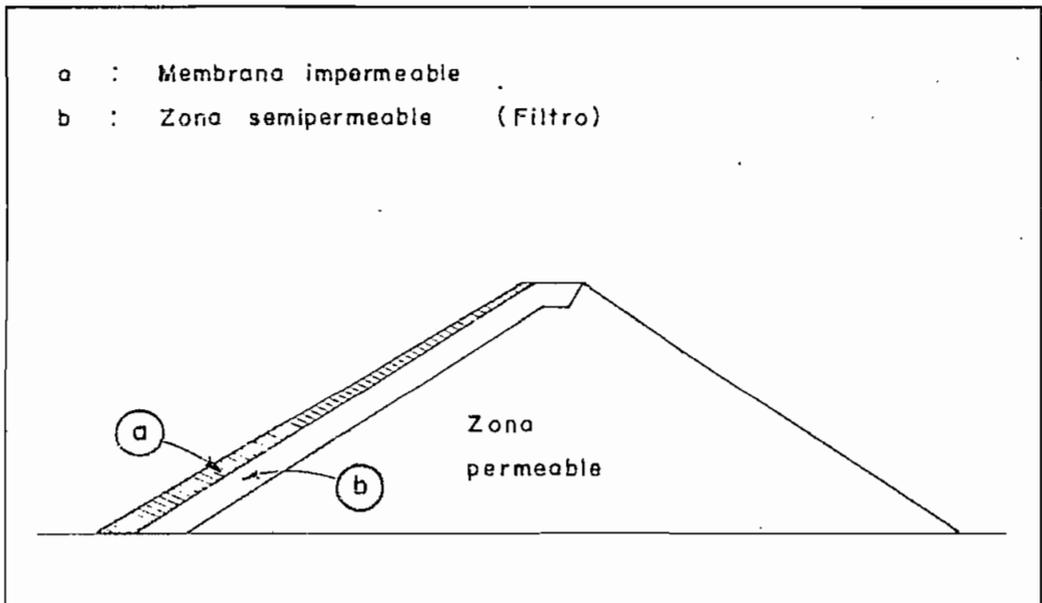


Fig. 2 PRESA DE MEMBRANA SUPERFICIAL

inclinado dando lugar a una gran area para ubicación de los materiales permeables. Esta característica representa la mayor ventaja de este tipo de construcción, pues la zona permeable - que ocupa la mayor parte del embanque puede ser construída separadamente del núcleo y previamente a las otras porciones de la presa, con lo cual puede acortarse el período de construc - ción aún más que en el tipo de núcleo central bajo condiciones desfavorables de tiempo.

La desventaja de estas presas se manifiesta - cuando son usadas en reservorios cuyo nivel de agua tiene un amplio margen de variación, pues la estabilidad del paramento - de aguas es menor que en las presas con el núcleo vertical.

#### Presas de membrana superficial. (Gráfico 5.2, figura 2)

Este tipo de presas se adopta cuando en el sitio del proyecto existe predominancia de materiales permeables y casi no exis - ten materiales impermeables como la tierra, o cuando hay mucha variación del nivel del agua en el reservorio como puede ocu - rrir en las centrales con almacenamiento por bombeo.

El embanque principal se construye de roca suelta lo cual permite hacerlo en forma económica y dar mayor segu - ridad a la construcción, en tanto que la membrana impermeable se hace normalmente de concreto reforzado o concreto asfáltico.

Este tipo de solución tiene el inconveniente de que da lugar al fácil aparecimiento de grietas en la superficie

de la membrana, debido al asentamiento diferencial del embanque o la fundación con respecto a la membrana que forma un cuerpo separado, por lo que se hace necesario dar suficiente compactación al embanque durante la construcción para esperar el menor asentamiento posible.

## 2) Características de diseño.

El ancho de la cresta del dique depende de la practicabilidad de los trabajos de construcción de cada zona, no habiendo limitaciones especiales sino en cuanto a los requerimientos de tráfico sobre ella. Una condición necesaria es cubrir la cresta con una capa de grava o roca fina compactada y dotarla de una pendiente suficiente que permita el drenaje de las aguas lluvias. Cuando las condiciones de tráfico son severas la cresta puede ser pavimentada con concreto asfáltico.

El paramento de aguas de la presa se protege contra la acción de las olas por medio de un escollerao de rocas grandes, en tanto que el paramento de aire no necesita protección especial si está constituido de fragmentos de roca o cantos de buen tamaño; pero si está hecho de partículas de tamaño comparativamente pequeño como grava o conglomerado, la protección a base de escollerao se vuelve necesaria. La práctica común para proteger de la lluvia los paramentos formados por material impermeable como la tierra es usar césped para evitar arrastres.

Durante la construcción de la presa e inmediatamente después ocurren asentamientos del embanque en una proporción total de 0,2 a 0,3 % de la altura total de la presa, dependiendo del tipo de materiales y del método de embanque usado. El asentamiento de las rocas sueltas acomodadas por capas y compactadas, es generalmente menor que el de las rocas volcadas, siendo menor el asentamiento cuando más delgadas son las capas de compactación.

El desplazamiento horizontal de las presas de material suelto es causado por la presión del agua y toma valores aproximadamente la mitad de los valores de asentamiento.

### 3) Materiales para el embanque.

En términos generales puede decirse que no hay material que no deba usarse en este tipo de presas. El principal problema radica en determinar el uso más económico de esos materiales, pues el tipo y distribución interna del embanque depende de las cantidades, tipos y localización de los materiales. Aún si algunos materiales no pueden ser usados en forma natural, es posible usarlos en combinación con otros materiales o después de alguna forma de procesamiento. El uso de los materiales que se obtienen en la excavación del vertedero, del canal de desfogue, de la casa de máquinas y de otras estructuras auxiliares tiene mucha influencia en la economía del diseño.

Las características físicas, químicas y estrucu

turales de los materiales disponibles, así como las cantidades existentes se determinan a base de exploraciones, investigaciones y ensayos en el terreno y en el laboratorio. Este es un paso muy importante especialmente en lo relacionado con la existencia de material fino o tierra que se va a usar en el núcleo impermeable, pues éste afecta decisivamente en el tipo y en la forma de la presa escogidos. En los sitios en que este material es escaso, puede ser más económico construir como impermeabilizante una membrana de obra de fábrica por ejemplo.

Los materiales impermeables como la tierra vegetal tienen normalmente resistencia al corte más baja que los materiales permeables, por lo que puede ser más ventajoso desde el punto de vista de la estabilidad contra el deslizamiento proveer al dique de un más delgado núcleo impermeable; mientras que contra el asentamiento o los movimientos sísmicos es más estable un núcleo de mayor espesor. Por lo tanto, el espesor del núcleo impermeable estará determinado por las propiedades de los materiales de tierra que van a usarse, razón por la que deben seleccionarse aquellos que siendo de fácil manejo tengan el coeficiente de permeabilidad requerido, elevada densidad y elevado esfuerzo de corte después de la compactación.

c) Presas de obra de fábrica.

Aún cuando entre estas presas se cuentan las de mampostería de piedra y las de roca tallada acomodada sin

mortero, éstas no son muy usadas en la actualidad debido al progreso de la técnica del hormigón y a las ventajas y facilidades del uso de éste aún en los diseños más complicados. Entre las presas de hormigón que se han desarrollado grandemente en los últimos años se tienen las siguientes:

1) Presas de gravedad.

El principio en el que se basan las presas de gravedad es el de contrarrestar por acción del peso propio de la presa la presión del agua que tiende a causar deslizamiento o vuelco del obstáculo que se opone a ella. Para este objeto la estructura cuenta con una gran masa de concreto, mayor que la necesaria para otros tipos de presas en los que la presión del agua se transmite a las fundaciones por medios especiales.

La ventaja de este tipo de presas está en que permiten usar sus escarpas como desfogue de los vertederos del embalse, lo cual es de gran beneficio en proyectos que tienen condiciones de descarga de las crecientes muy rigurosas.

En muchos casos el costo de las fundaciones de estas presas puede ser menor que para otro tipo de presas de hormigón, debido al menor esfuerzo al que están sometidas; además, en razón de los requerimientos poco exigentes para la resistencia del hormigón, es posible usar uno de bajo grado y por consiguiente menor cantidad de cemento, lo cual abarata el costo de la obra.

La simplicidad de las formas de este tipo de presas facilita el hormigonado reduciendo los costos unitarios de construcción, por lo que puede ser favorable algunas veces aún en sitios en donde las descargas de las crecientes no lo requieran.

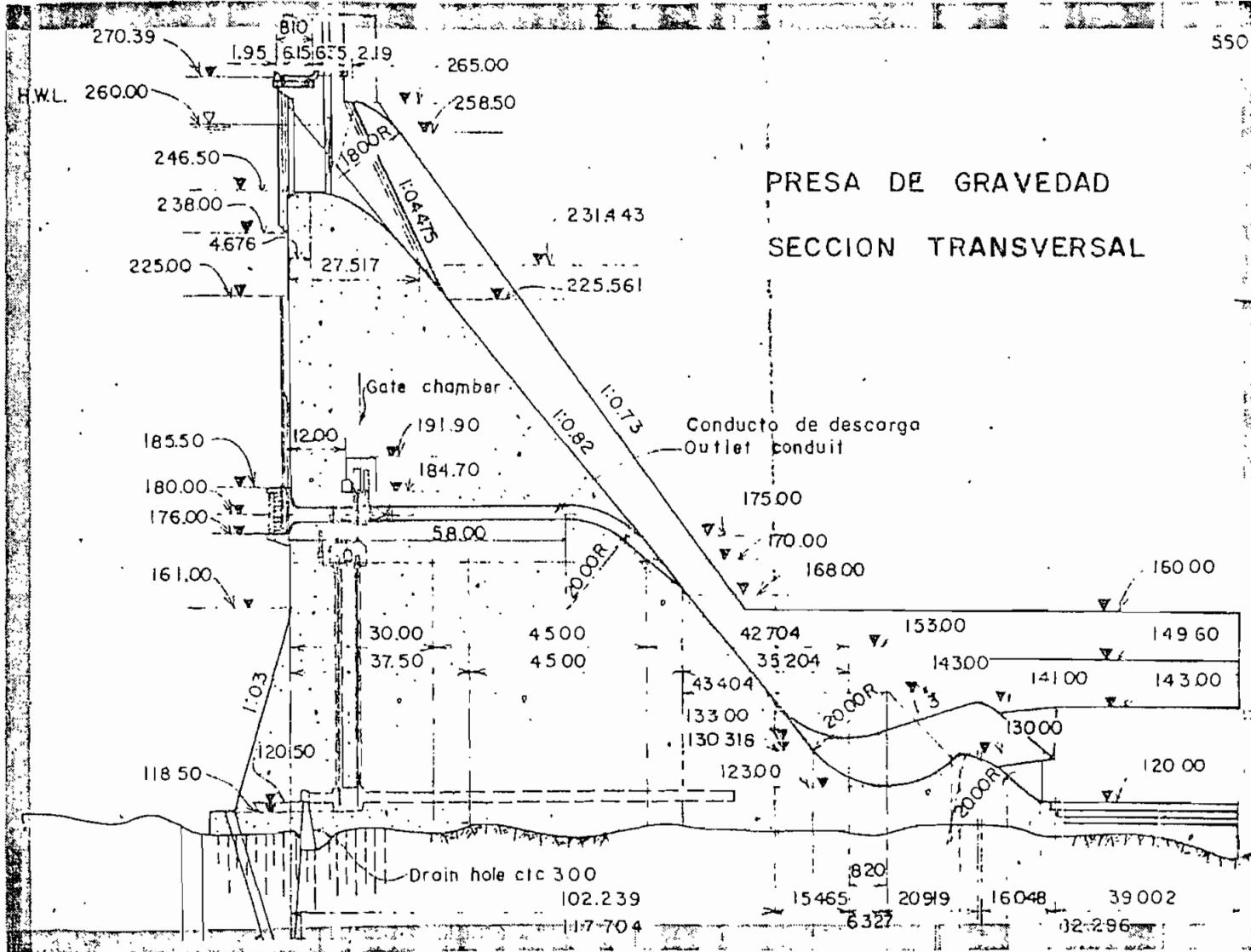
Cabe mencionar al tipo combinado de presas de arco gravedad, el que conjuga las características de esta presa con la acción del arco que transmite la presión del agua a las fundaciones.

El gráfico 5.3. muestra el esquema de una sección transversal de una presa de gravedad.

## 2) Presas de arco.

La presión del agua actuante en este tipo de presas es transmitida principalmente por la acción del arco a las rocas del lecho en donde van los fundamentos, por lo que, la tendencia moderna es dar mayor énfasis al cálculo de éstos que a otros aspectos de la presa. Un elemento fundamental a considerarse es la elasticidad de los materiales del lecho, del valor de cuyo módulo dependerá la factibilidad de adoptar este tipo de presa en un sitio determinado. Generalmente hablando puede decirse que una roca es apta para soportar las fundaciones de una presa de arco cuando su módulo de elasticidad es del orden de los 40 ton/cm<sup>2</sup>, debiendo tomarse este valor como una simple referencia para adoptar un criterio rápido. Sin embargo, el diseño global de este tipo de presas requiere de

Gráfico 5.3



un especial cuidado por las severas condiciones con que debe - trabajar el hormigón, el mismo que es usado en cantidades reducidas si se lo compara con la presa de gravedad por ejemplo.

En este tipo de presas es posible dar un tratamiento seguro a las descargas de creciente cuando estas son relativamente pequeñas, haciéndolas fluir por sobre el arco, o mediante orificios en el cuerpo, o a base de vertederos laterales. Como regla general, un tratamiento económico de las descargas de creciente con este tipo de presas se considera dificultoso.

Por estas consideraciones, la adopción de las presas de arco resulta ventajosa en sitios en donde los materiales del lecho para la fundación son favorables, a menos que existan dificultades para la instalación del vertedero del embalse.

Un esquema de la sección transversal de una - presa de arco se da en el gráfico 5.4.

### 3) Presas de contrafuerte

Las presas de contrafuerte llamadas también - presas huecas tienen las cara de aguas arriba inclinada para soportar la presión del agua por su propio peso, más el peso del agua, transmitiéndola al fundamento por medio de contrafuertes separados uniformemente, en los que la fuerza resultante actúa oponiéndose al deslizamiento de la presa.

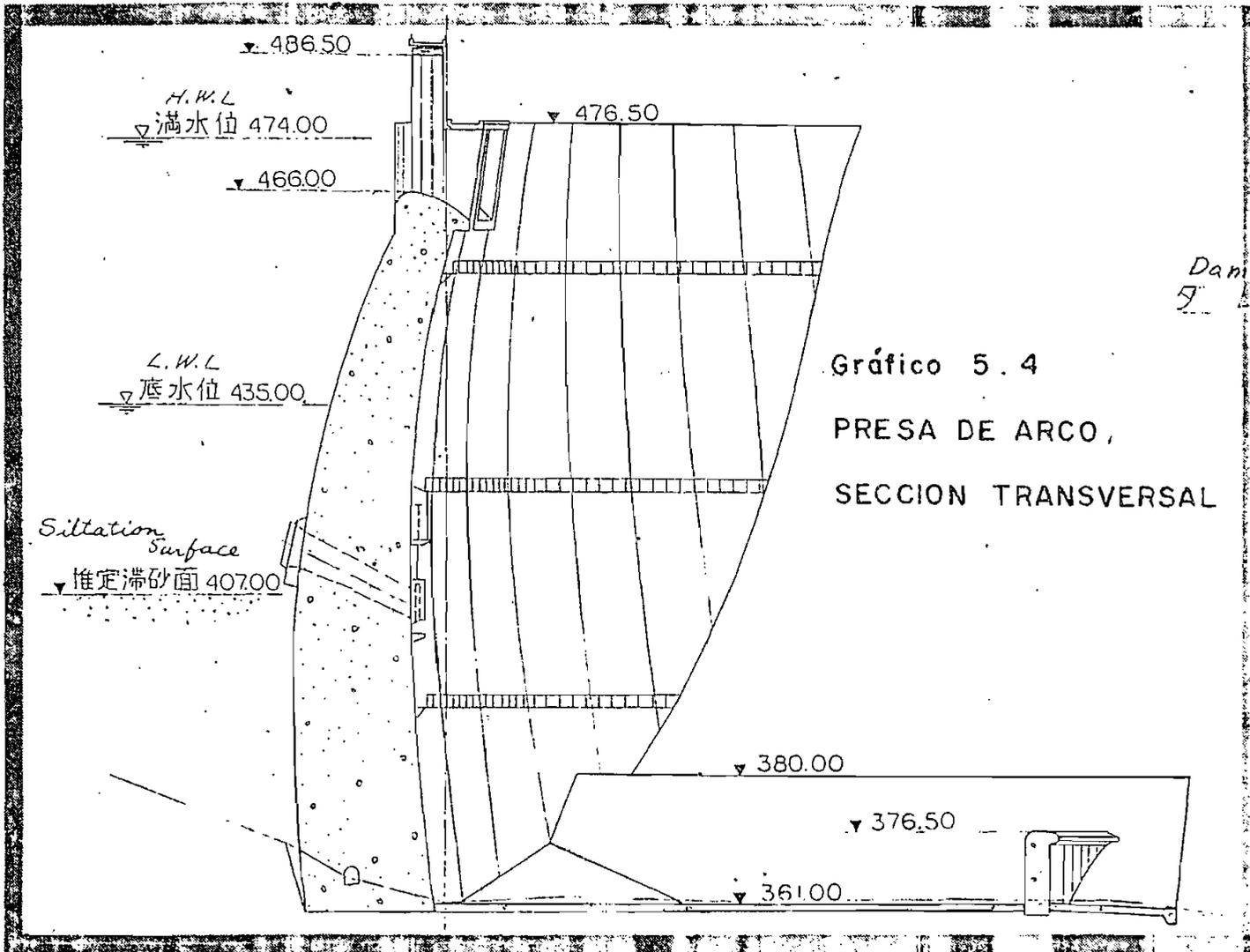


Gráfico 5.4  
 PRESA DE ARCO,  
 SECCION TRANSVERSAL

Estas presas tiene algunas ventajas como son el reducido volumen de hormigón necesario, la eliminación de la fuerza de levantamiento que causa la subpresión en las presas de gravedad y la facilidad que presentan para la instalacon de vertederos en la cara de aguas abajo. El inconveniente que puede imputárselas es el de la dificultad de formas - que presentan para el hormigonado si se compara con las presas de gravedad o de arco. Por otro lado hay un problema que queda por resolverse en este tipo de presas y es el de la estabilidad del armazón trabajando en zonas sísmicas. En tal caso se vuelve preferible la adopción de una presa de gravedad aligerada cuyas características son similares a las de ésta en algunos aspectos.

#### 4) Presas de arco múltiple

Una presa de arco múltiple transmite la presión del agua parcialmente en forma de empuje hacia los contrafuentes de que está provista, y otra parte hacia los estribos por acción del arco. Tiene generalmente también la cara de aguas arriba inclinada para asegurar resistencia contra los deslizamientos de los contrafuentes.

Este tipo tiene la ventaja de requerir un volumen algo inferior de hormigón que otro tipo de dique en sitios de espaciamiento considerable, pero tiene el inconveniente de no prestar mucha seguridad contra las descargas de las crecientes.

5) Selección del tipo de presa.

El tipo de presa que debe adoptarse está determinado por las características del sitio en el que va a ser construída, su condición topográfica y geológica, la magnitud de la descarga de creciente, la altura necesaria, la intensidad de los movimientos sísmicos en el sitio y la localización de la casa de máquinas y otras estructuras auxiliares; una o varias de tales características se distinguirán en el diseño para dar seguridad y economía a la construcción.

En conexión con las condiciones que presenta el sitio en el que va a instalarse la presa, la selección de un tipo determinado tiene relación con diversos factores como son la presión estática del agua, la presión dinámica, la presión de los sedimentos, la inercia en los movimientos sísmi -cos, la presión de levantamiento o subpresión, el peso del dique, las presiones debidas a los cambios de témperatura, etc, los cuales ponen a prueba el cumplimiento de los requisitos - que aseguran la estabilidad de la presa escogida. Estos re - querimientos son:

- 1.- El esfuerzo interno del dique debe tener un valor por debajo del esfuerzo admisible del hormigón, el mismo que es determinado por ensayo del material antes que por diseño.
- 2.- El esfuerzo que se transmite a la fundación no debe ser mayor que el esfuerzo de empuje de la fundación.
- 3.- El dique no debe sufrir deslizamientos en la superficie - de contacto con la fundación.

Para asegurarse del cumplimiento de estas condiciones se recurre a ensayos en modelos reducidos, o al cálculo usando sistemas de computación cuando se trata de obras de importancia. En los casos de presas de gravedad o de contrafuerte pueden ser suficientes las comprobaciones del esfuerzo interno y del deslizamiento, pero en tratándose de una presa de arco resulta imperativo comprobar la resistencia de la fundación debido a los altos esfuerzos que produce el trabajo del dique.

Al analizar la estabilidad de las fundaciones es necesario obtener suficientes datos del comportamiento de las rocas del lecho, así como de las características de deformación que pueden causar los esfuerzos transmitidos por la presa. Estas características pueden ser conocidas por medio de experimentos realizados en el terreno, aún cuando sea con una precisión muy relativa, pues las cualidades de las rocas de los lechos son muy difíciles de determinar.

d) Aliviaderos de las presas

Los reservorios de almacenamiento a que dan origen los represamientos de los cursos de agua deben ser provistos de vertederos o aliviaderos capaces de descargar el máximo caudal de creciente previsto con la seguridad necesaria para no poner en peligro las obras de contención.

Para ubicarse en el lado seguro al diseñar -

los vertederos se asume que el caudal de creciente que afluye al reservorio puede ocurrir cuando el reservorio está totalmente lleno. Sin embargo, el máximo valor de diseño de las crecientes se verá atenuado por la capacidad de almacenamiento del reservorio que retiene una considerable cantidad de agua entre el nivel del vertedero y la máxima carga que produce el acumulamiento, reduciendo así la capacidad de descarga del vertedero en una cantidad muchas veces significativa.

El retardo que se produce entre los caudales de creciente que afluyen al reservorio y la descarga por el vertedero en función del almacenamiento por sobre su nivel, es una función del monto del caudal afluyente al reservorio, del almacenamiento disponible sobre el nivel del vertedero y del monto de la descarga del reservorio. Todos estos factores son variables durante la ocurrencia de las crecientes y no en forma suficientemente regular para ser generalizados en forma matemática, por lo que los procedimientos analíticos se basan en el examen separado de varias ocurrencias hidráulicas. No obstante, para un intervalo específico de tiempo (dt) se cumple la siguiente igualdad.

$$D \cdot dt = Q \cdot dt - dS$$

en donde,

Q = Caudal entrante

D = Descarga del reservorio

S = Almacenamiento disponible

Asumiendo que los valores promedios de la des carga y el caudal son cercanamente iguales a los valores me -  
dios aritméticos de los valores registrados al comienzo y al  
final del período (dt), es posible determinar por medio de es  
ta ecuación, para un intervalo determinado y una ocurrencia  
hidráulica específica, la descarga típica producida por un -  
caudal típico afluente al reservorio. La carga sobre el -  
vertedero puede conocerse a base de las curvas de area y vo -  
lumen de almacenamiento ya estudiadas. De este modo la capa  
cidad del vertedero quedará determinada para esas condicio -  
nes específicas.

#### Selección del tipo de aliviadero

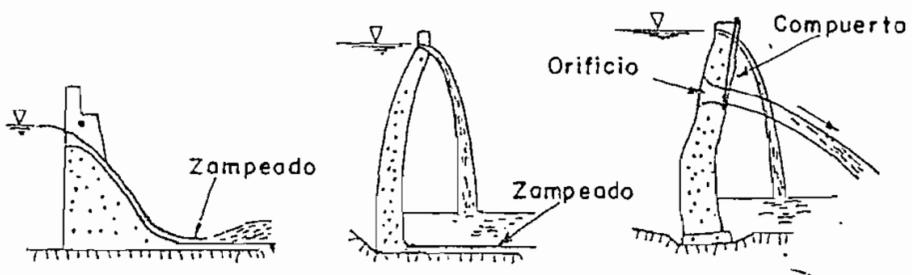
Existen varios tipos de vertederos usados co -  
munmente como obras de seguridad en los embalses de las utili -  
zaciones hidráulicas, entre los que se pueden citar los si -  
guientes, que también aparecen en el gráfico 5.5.

- Vertedero de desborde central y canal de desfogue
- Vertedero de desborde central y caída libre
- Vertedero de orificio
- Vertedero de túnel
- Vertedero de canal lateral

El criterio con que se adopte un determinado  
tipo de vertedero no puede estar separado del criterio usado  
en la adopción del dique, pues como ya se vió, al adoptar una  
presa determinada se hacen estrechas consideraciones de las -

# Grafico 5.5

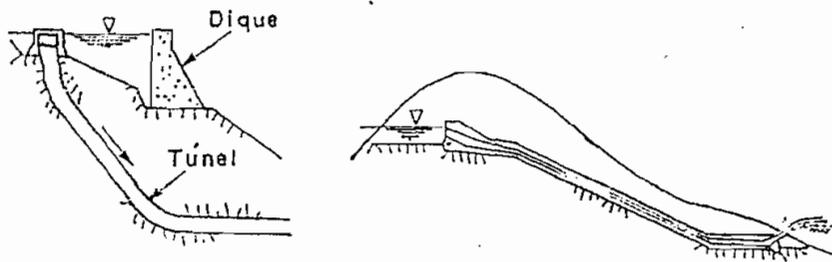
## TIPOS DE VERTEDEROS EN LAS PRESAS



Vertedero de desborde central y canal de desfogue

Vertedero de desborde central y caída libre

Vertedero de orificio



Vertedero de túnel

Vertedero de canal lateral

características de las crecientes. El tipo de vertedero a usar se estará pues determinado por las condiciones topográficas, - geológicas e hidrológicas, por la altura y tipo de la presa, - por la cota de elevación del agua en la descarga y por la localización de la central y las instalaciones auxiliares.

En muchos casos el tipo de desborde central con canal de desfogue puede usarse aprovechando la escarpa de las presas de gravedad o puede adecuarse convenientemente en las - presas de contrafuerte, mientras que el tipo de desborde central con caída libre es aplicable a las presas de arco. Cuando no es posible adicionar el vertedero al cuerpo de la presa por razones de estabilidad o por abundante descarga en las crecientes, se adoptan los vertederos de túnel o de canal lateral que son construidos separadamente de las presas, aún cuando esta solución pueda representar encarecimiento de los costos del proyecto.

En los reservorios de usos múltiples, entre los que está incluido el riego, pueden usarse los vertederos de orificio combinados con cualquiera de los otros tipos mencionados. Esta posibilidad permite aprovechar la capacidad del vertedero diseñado para este uso particular en el control de las crecientes.

En el diseño de los vertederos es usual recurrir a los modelos hidráulicos a escala, cuyo estudio se combina con el cálculo de las condiciones físicas del proyecto.

## 5.2. OBRAS DE CAPTACION Y CONDUCCION

Se había mencionado que la finalidad de los embalses producidos por las presas que se oponen a las corrientes de los ríos es almacenar el agua en las épocas de abundancia y crear saltos aprovechables en las utilidades. Precisamente con este objeto, el agua debe ser captada del embalse en la forma más conveniente para la utilización, para luego ser conducida al sitio de su aprovechamiento por medio de los conductos o vías de agua.

Las obras de captación en una utilización hidroeléctrica comprenden todas aquellas estructuras que permiten la toma del agua en condiciones controladas, y están formadas principalmente por compuertas o válvulas que franquean el paso del agua hacia los conductos y por estructuras auxiliares que eliminan los cuerpos extraños que acarrea el agua y que pueden ser perjudiciales. Estas estructuras pueden ser desviadores de materiales flotantes, rejillas y conductos de evacuación.

El tipo y disposición de la toma de agua, así como la manera en que ésta es controlada, dependen de la naturaleza del proyecto. La ubicación se determina teniendo en cuenta el aprovechamiento del mayor volumen almacenado posible, escogiéndose aquella que permita el máximo rendimiento anual del salto. Por regla general estará situada a un nivel superior al del cauce, con el fin de evitar el arrastre de los se-

dimentos de fondo hacia los conductos de agua.

Siendo generalmente la toma de agua un tramo de transición, entre las formas necesariamente diferentes de la bocatoma y la vía de agua, y estando por lo tanto sujeta a fenómenos hidráulicos de cavitación y fricción excesiva, su dimensionamiento es determinante del nivel a que lleguen las pérdidas de carga. Puesto que la fricción y las pérdidas varían con el cuadrado de la velocidad del agua, la sección de entrada debe ser suficientemente amplia para proveer de una adecuadamente baja velocidad que reduzca tales fricción y pérdidas de carga y elimine la cavitación. No obstante, el perfeccionamiento en el diseño de una transición sin pérdidas estará plenamente justificado en una utilización de baja caída, mientras que en una caída relativamente alta estas pérdidas pueden ser tolerables en cierto grado, siempre que se haya eliminado la posibilidad de cavitación en las formas de la transición, para lo cual deben evitarse esquinas angulosas y contracciones o expansiones abruptas de las secciones, permitiendo el paso del agua de manera uniforme y con cambios graduales.

a) Rejillas

La rejilla es una pantalla hecha de pletinas o varillas de hierro y colocada a través de la bocatoma con el fin de captar los materiales extraños que trae el agua y que pueden ocasionar perturbaciones u obstrucción en los equipos

de la casa de máquinas, especialmente en las turbinas, válvulas y sistemas de enfriamiento que usan agua. Las rejillas se soportan en vigas convenientemente espaciadas, capaces de resistir el empuje del agua cuando aquellas se congestionan con basura. Usualmente se instalan formando un ángulo con la vertical, en tal forma que permitan la limpieza desde la parte superior, pero pueden en ocasiones instalarse verticales cuando los materiales que acarrea el agua sean de mayor peso y no tengan facilidad de adherencia, de modo que puedan caer al fondo para ocasionalmente ser evacuados haciendo uso de los conductos de evacuación.

El espaciamiento entre los elementos de las rejillas dependerá de la abertura permisible de los pasos de agua en los equipos hidráulicos. Por ejemplo en las turbinas de hélice no influirán mayormente si pasan cuerpos grandes que pueden dañar a los distribuidores de la turbina Francis; por otro lado, si más pequeño es el espaciamiento, mayores serán las pérdidas de carga y más fácilmente se obstruirán las rejillas.

La limpieza de las rejillas puede hacerse por medios manuales o mecánicos, dependiendo de la cantidad y calidad de materiales que éstas recojan.

#### b) Compuertas

Las compuertas en las utilidades hidroeléctricas normalmente no sirven para regular el flujo de agua, puesto que esta función está a cargo del regulador de la turbina

na.

Excepto en casos en que el agua se conduce por un canal abierto en donde es necesario mantener su altura de carga, las compuertas permanecen totalmente abiertas o se cierran completamente para operaciones de mantenimiento o reparaciones de las vías de agua y eventualmente para reducir las filtraciones en la válvula de entrada a las turbinas o en las turbinas mismas, cuando éstas están fuera de servicio.

#### 1) Tipos de compuertas

El tipo de compuerta que una utilización use dependerá del sitio en que está ubicada la toma de agua. Existen las compuertas de baja presión que se ubican cerca a la superficie donde la presión es pequeña, y las de alta presión que están sumergidas y operan con presión considerable.

En las tomas superficiales o de baja presión se usan comunmente las compuertas verticales y las compuertas radiales. Las primeras son deslizantes sobre guías o rieles y siendo las más económicas tienen el inconveniente de la fricción de deslizamiento elevada producida por el empuje del agua, por lo que se requiere de mucho esfuerzo para subirlas o bajarlas y ordinariamente necesitan de una válvula de comunicación lateral ("by-pass") para llenar la vía de agua, si ésta se ha vaciado, y contrarrestar la presión unilateral para poder abrirlas. El cierre se puede producir por gravedad si no existe flujo de agua. Las compuertas radiales están formadas por un sec-

tor cilíndrico que se rebate sostenido en muñones sobre estribos soportantes, y puesto que éstas se mueven en un arco circular, no requieren mucho espacio superior, pudiendo el mecanismo de operación ubicarse en una posición más baja que para las compuertas planas. En algunos casos están equipadas con contrapesos que hacen más fácil la operación de subida, en tanto que para la bajada es suficiente la acción de su propio peso - pues no existe fricción de deslizamiento sino un pequeño rozamiento de giro en los muñones.

En las tomas sumergidas se usan compuertas capaces de soportar la carga del agua, y ocasionalmente se usan válvulas. Sus características difieren de las compuertas usadas en la superficie, pues se hace necesario que tengan luces comparativamente más reducidas para disminuir el empuje del agua y consecuentemente están sujetas a los efectos de velocidades mayores en la entrada. Las más usadas son las compuertas cilíndricas pero se usan también las compuertas verticales planas con mecanismos de accionamiento especiales. Entre las válvulas usadas están las llamadas de compuerta, de aguja, esféricas y de mariposa.

#### c) Obras de conducción

El agua que se capta en las tomas ubicadas en o junto a las obras de contención es conducida a las centrales de generación por medio de las vías de agua y más específica -

mente por las vías de carga. Estas pueden tener variadas formas y frecuentemente son combinaciones de dos o más diferentes tipos entre los que se pueden citar los conductos abiertos que son canales o acueductos y los conductos cerrados que son túneles, tuberías a baja presión y tuberías de presión. Los túneles pueden ser a nivel libre y bajo presión.

Los conductos abiertos son generalmente más económicos, siendo el costo de construcción de los acueductos algo mayor que el de los canales debido a su estructura de sustentación. Los túneles son por el contrario los más costosos entre los conductos para una determinada longitud, pero se justifican cuando su uso representa un ahorro considerable de distancia con respecto al uso de los canales. Las tuberías de presión se usan cuando la pendiente del terreno es demasiado fuerte para un canal o túnel, y fundamentalmente para la parte final de la vía de carga en donde ésta gana la casa de máquinas en una forma rápida y abrupta. Las tuberías de presión pueden ser construídas teóricamente para cualquier altura, pero su costo crece más rápidamente que su longitud debido al aumento de la presión que debe soportar. Además, mientras más largas, están sujetas a presiones anormales que pueden ocasionarlas daños, por lo que se requiere dotarlas de tanques o cámaras de equilibrio o tomar otras medidas de seguridad que aumentan su costo.

La Velocidad del agua en los canales puede lle

gar hasta 1,0 m/seg, mientras que en los túneles puede ser de 5,0 m/seg y en las tuberías es común encontrar velocidades de 8 o más m/seg para grandes caídas. Mientras más grande es la velocidad, mayores son las pérdidas de carga, pero como generalmente las mayores velocidades están asociadas con utilidades de gran caída, la reducción en la capacidad de las plantas a las que alimentan estas largas tuberías puede no ser significativa.

#### 1) Características de los canales

La más importante consideración que se hace al diseñar los canales es la determinación de las pérdidas de carga, pues éstas tienen relación con la velocidad del agua y las características físicas del canal como su forma y los materiales empleados en el revestimiento. Como criterio de partida se acepta que las pérdidas mínimas para una velocidad y un área dadas se obtienen cuando el radio hidráulico del canal corresponde en longitud a un medio de su profundidad; y en tratándose de un canal o acueducto de sección rectangular, esta sección hidráulica óptima corresponde también a la sección más económica si se tiene en cuenta únicamente la excavación del perímetro mojado, independientemente de otras consideraciones. Esta sección como se sabe es aquella que tiene un ancho doble que la profundidad. Sin embargo, en cuanto exista una considerable área de excavación entre la superficie del terreno y el nivel del agua, dicha sección ya no será muy económica siendo preferible disminuir el ancho y profundizar

la solera.

En cuanto a la influencia de los materiales de revestimiento se puede conseguir una notable disminución de las pérdidas de fricción guarneciendo la superficie con hormigón, pudiéndose por lo tanto aumentar la velocidad de diseño y consecuentemente aumentar su capacidad de conducción o reducir su area y su costo para un caudal determinado. Además, este tipo de revestimiento previene la erosión y reduce las filtraciones que ocurren en los canales de tierra. No obstante, en muchos canales en que la velocidad es baja desaparecen estos inconvenientes y el revestimiento puede no justificarse.

Los acueductos tienen las mismas características de los canales revestidos pero van montados en estructuras de soporte a manera de puentes para salvar las ondulaciones del terreno. Estos se usan justamente en conexión con los canales para evitar los largos recorridos que demandaría seguir la línea determinada por la pendiente del terreno. Para la construcción de los acueductos se puede emplear hormigón, madera o acero, dependiendo de las características del proyecto y de las disponibilidades económicas. La madera es generalmente más barata pero tiene el inconveniente de su corta duración, mientras que el hormigón requiere de poco mantenimiento. Las características de los materiales que se usan permiten dar una mayor velocidad a la conducción y reducir la sección.

2) Características de los túneles.

La solución más conveniente para conducir el agua de las utilizaciones hidroeléctricas en zonas montañosas de terreno muy irregular es a menudo la adopción de un túnel. Cuando en una utilización de gran caída se usa túnel, la conducción se efectúa bajo presión y luego se conecta con las tuberías en la última porción del salto que corresponde a la mayor pendiente. Algunas veces la topografía favorece para la adopción de túnel a lo largo de toda la vía de agua, inclusive la descarga, en cuyo caso la central necesariamente debe ser subterránea, pudiendo el tramo de mayor pendiente necesitar revestimiento especial que puede ser metálico, lo que le confiere características combinadas de túnel y tubería de presión.

La construcción de los túneles en terrenos formados por roca sólida presenta normalmente menos dificultades que en arcilla o conglomerado, y se vuelve muy complicada cuando existen fuentes de agua subterránea o filtraciones de la superficie. Si las filtraciones no producen desprendimientos de material, el agua puede simplemente bombearse al exterior, pero en caso de material inestable pueden ser necesarios los entibamientos que encarecen notablemente el costo y alargan el período de construcción. En ciertos casos puede convenir producir una sobrepresión interna mediante aire comprimido para contrarrestar la presión del ceno.

Cuando las paredes del túnel están formadas por materiales inestables, se hace necesario revestirlas para

prevenir la socavación, pudiendo requerirse también cuando la presión de la conducción excede la resistencia del material circundante. Aún en el caso de no necesitarse por estos motivos, el revestimiento es deseable para evitar filtraciones y reducir las pérdidas de carga por rozamiento del agua en las paredes y el lecho irregulares, lo cual puede permitir por otra parte, hasta duplicar la capacidad del túnel o en su defecto reducir apreciablemente la sección. Para el revestimiento de los túneles se usa ordinariamente hormigón, excepto para los tramos de pendientes elevadas como los que ya se mencionó de bajada a la casa de máquinas, en donde puede necesitarse revestimiento metálico que determine características similares a las de las tuberías de presión.

La mejor sección hidráulica para una conducción bajo presión es la circular, pero es más usual la sección de herradura por la facilidad que presta el piso plano para el movimiento de los equipos de construcción. La pendiente adoptada para los túneles es generalmente igual al porcentaje de pérdidas adoptado para plena carga, valor que sin ser definitivo sirve de referencia para estimaciones preliminares.

La tendencia moderna en la construcción de túneles a gran presión como los ultimamente usados en reemplazo de las tuberías convencionales, es dar mayor énfasis al tratamiento de las rocas circundantes, mediante inyecciones de cemento o enlechado, que al revestimiento en sí. Dicho enlecha

do de las rocas circundantes tiene objetivos tan importantes - como el de restaurar la unidad del material en las partes defectuosas originadas en la construcción, restituir el carácter elástico de las rocas, permitir una mayor adherencia del revestimiento con la superficie de contacto y evacuar el agua subterránea de las grietas cercanas. Esta moderna concepción del enlechado en los túneles tiende a mejorar la naturaleza propia de las rocas y proveerlas de un tensado previo a su trabajo normal. El enlechado llena las fisuras existentes, con lo que se gana en continuidad y se mejora su naturaleza elástica. El prestensado por otro lado devuelve la tensión inicial disturbada por los métodos de excavación y las dota de una sobreten - sión que las ayuda a soportar la tensión que causa la presión interna del túnel durante su operación.

### 3) Sobrepressiones en los conductos

Los conductos cerrados que trabajan bajo presión como los túneles y las tuberías se diseñan para resistir las presiones normales de operación, pero resulta usualmente - más económico diseñar tanques o cámaras de equilibrio o emplear otros medios mecánicos para limitar las sobrepressiones que aparecen por acción de los órganos de cierre al final de los conductos, que aumentar su resistencia para que puedan resistir - las sin esos elementos.

El efecto conocido como "golpe de ariete" es

un súbito golpe de presión que aparece en los conductos cuando su abertura se cierra bruscamente. Durante la operación normal de las turbinas el regulador automático de velocidad abre o cierra el paso de agua de acuerdo a las variaciones de la carga, produciendo cambios en la presión de los conductos que se transmiten en toda su longitud. Los llamados tanques de equilibrio están capacitados para absorber estas variaciones de presión mediante fluctuaciones en el nivel del agua que almacenan en su interior, de modo de que no sean transmitidos más allá de su posición. Por tal causa los tanques de equilibrio se sitúan lo más cerca posible de la casa de máquinas, con lo cual los tramos de conducto protegidos son más largos, y los tramos que deben soportar la sobrepresión y por lo tanto ser reforzados son más cortos.

Los cambios de presión en las tuberías dependen además de la longitud y tamaño de ellas, de la velocidad del agua y de la rapidez con que los órganos de cierre de las turbinas operen para dejar pasar o cortar el paso de agua. Una operación más lenta se requerirá para conductos largos que para conductos cortos en donde las sobrepresiones no son elevadas.

El diseño de los tanques de equilibrio envuelve una serie de problemas hidráulicos que deben ser considerados y tienen relación con los niveles de sobrepresión y subpresión que los órganos de cierre pueden ocasionar y con la capacidad de almacenamiento necesaria asociada a esos niveles.

Para su determinación se adoptan las condiciones más críticas que pueden presentarse en la instalación y que son; la descarga rápida de la carga total acoplada al conducto en condiciones de máximo nivel de agua en la captación, y la carga rápida desde media carga hasta plena carga en condiciones de mínimo nivel de agua en la captación. En realidad, un incremento rápido de la mitad de la carga acoplada a un conducto puede no llegar a tener lugar, pero se usa en forma convencional equivalente a un incremento más lento de la carga total.

En los tanques de equilibrio se produce una oscilación del sistema hidráulico que es absorbida por la superficie libre del líquido, teniendo la forma del tanque y su capacidad que adaptarse a las características del fenómeno. Por lo tanto, resulta dificultoso reducir su capacidad más allá de un cierto grado dentro de los sistemas convencionales de diseño. Para lograr economía en el diseño es posible adoptar sistemas especiales que permiten reducir la capacidad de los tanques hasta en un 50 % mediante el sistema de tanques -diferenciales o el de tanques de orificio. Los tanques de desborde son adecuados para absorber las sobrepresiones, pero no lo son para las subpresiones ocasionadas por las aberturas bruscas del cierre. Otros procedimientos para controlar las presiones anormales se emplean en los tanques de amortigua -ción por aire o los tanques supresores de aire, pero son medidas poco económicas para el costo total del sistema.

La solución ideal resulta de todos modos construir los conductos sin tanque de equilibrio, pero su aplicación está limitada a una cierta longitud del conducto pues el golpe de ariete crece en proporción a dicha longitud.

El efecto del golpe de ariete es inevitable en las turbinas a reacción como ya se explicó; no obstante, en tratándose de unidades con rodetes gigantes es posible aumentar el tiempo de cierre sin que se alteren en mayor grado las revoluciones de diseño, permitiendo esta medida la ampliación de la longitud de aplicabilidad de dicha solución.

Otros medios empleados para reducir el golpe de ariete son el de los desviadores de chorro en las turbinas Pelton y el de los reguladores de presión en las turbinas a reacción, siendo este último particularmente efectivo en instalaciones de pequeña descarga.

#### 4) Características de las tuberías de presión

Las tuberías se usan en ciertos tramos de los conductos de agua en los que la pendiente no permite el uso de otros tipos y especialmente para los tramos que deben soportar presiones elevadas, como las bajadas al llegar a la casa de máquinas.

En instalaciones de pequeña caída es factible el uso de tuberías de presión de hormigón reforzado o de duelas de madera enzunchadas, pero en caídas mayores, cuyo límite

puede ser 50 mts, es necesario el uso de las tuberías de acero. Estas pueden usarse sin restricciones, estando su resistencia condicionada a la caída y al diámetro de la tubería. Como la presión se incrementa gradualmente en la caída, es posible usar tramos de tubería de espesor variable de acuerdo a la resistencia necesaria. También es factible reducir los requerimientos de resistencia del material de las tuberías en las utilidades de gran caída, bifurcando la tubería en la parte final, o en su defecto usando dos tuberías desde los tanques de equilibrio o la toma. Estas tuberías tendrían una sección combinada equivalente a la sección de la tubería original, pero su espesor se reduciría en una proporción tal que el peso total en los dos casos permanezca el mismo. Sin embargo, en el caso de dos tuberías, las pérdidas por rozamiento son mayores a pesar de mantenerse la misma velocidad del agua; y el costo total de la conducción será más alto. Como dato de referencia se puede mencionar que el costo de una sola tubería es aproximadamente un 15 % menor que el costo de dos tuberías para la misma capacidad de conducción.

Con respecto a la forma de juntar diferentes tramos de tubería puede decirse que las uniones soldadas son más económicas que las uniones con bridas o remachadas, debido a las menores pérdidas por fricción que se presentan, pero tienen el inconveniente de la dificultad de desmontaje para las

restituciones.

El diseño de las tuberías de presión tiene en cuenta el efecto de las presiones anormales que persisten en el sistema después de aplicar las medidas mencionadas de protección contra las sobrepresiones causadas por el golpe de ariete, cuya determinación es un factor muy importante del diseño.

La presión del golpe de ariete en las tuberías es controlada exclusivamente por el tiempo de cierre de la entrada de agua a las turbinas. Según el método convencional este tiempo se selecciona de tal modo de no hacer el golpe de ariete excesivamente grande, pero esta medida redundante en un mayor tamaño de la unidad turbina generador, lo cual al final resulta menos económico.

Las turbinas de reacción tienden a aumentar su velocidad en los momentos de disminución de carga. Para restringir dicho aumento dentro de un cierto margen es necesario dotarlas de un momento de inercia rotante fijo. Por otra parte, si es menor el tiempo de cierre, menor será el aumento de velocidad en las descargas, pero la presión del golpe de ariete será mayor determinando un mayor peso de la tubería.

El efecto volante del grupo turbina generador (GD2) tiene relación con el peso del generador, por lo que se requiere un cuidadoso estudio para determinar la solución más económica entre aumentar el peso del generador, o aumentar el

peso de la tubería, cuando se va a decidir el aumento de velocidad permisible y el valor del golpe de ariete.

### 5.3. CENTRAL GENERADORA

Con relación a la ubicación, tipo y distribución interna de una central generadora existen diversos aspectos que deben ser considerados, teniendo en cuenta la función y la seguridad de la central, sin poner mucho interés en su apariencia o vistosidad. No importa el alcance o la concepción del proyecto, la central generadora es la parte fundamental, la más vulnerable y la más costosa de la utilización, y en cualquier caso su diseño planteará problemas específicos - que deben ser analizados extensivamente para llegar a las soluciones particulares que éstos demandan.

En este estudio se pretende emitir algunos - criterios en relación con este complejo problema, sin aspirar a pormenorizar los diferentes temas o particularizar ningún caso, sino más bien en forma general que sienta las bases para enfocarlo y tratarlo ordenadamente.

Localización. La localización de la central generadora se decide en conexión con las características generales del proyecto y las condiciones naturales del sitio. Con respecto a las primeras, se consideran la ubicación de la presa, de la vía de carga, de la tubería de presión y muy especialmente el número y tipo de unidades de generación. Con relación a las - condiciones naturales, se hacen consideraciones de las carac-

terísticas geológicas y topográficas del sitio, del comportamiento del caudal de avenida, de los materiales sólidos que acarrea el curso en esa parte, de la influencia de la descarga aguas abajo en lo referente al uso del agua para otras finalidades, del espacio disponible para patio de maniobras o subestación, de la accesibilidad al sitio, etc. Como puede apreciarse, todos estos factores limitan la flexibilidad que puede tenerse en la determinación del sitio de la central; sin embargo, para conjugar tales exigencias han surgido muchas y muy eficaces soluciones que han resultado en la construcción de diferentes tipos de centrales en las más variadas condiciones, dando lugar al desarrollo de verdaderos modelos que luego han sido empleados difusamente. De acuerdo a esto se puede intentar clasificar a las centrales desde diferentes puntos de vista.

a) Clasificación de acuerdo al tipo de construcción

1) Tipo de interior.

Es el tipo ordinario y más conocido en nuestro medio en el cual toda maquinaria y equipo adicional inclusive el equipo de elevación se encuentra dentro de la casa de máquinas.

2) Tipo semi-interior.

En él todo el equipo y maquinaria se halla dentro de la casa de máquinas, excepto el equipo de elevación que consiste en una grúa de pórtico para carga y descarga de las u

nidades de generación. La cubierta que es notablemente más ba  
ja que en el caso anterior necesita ser móvil o de tipo escoti  
lla.

### 3) Tipo de exterior.

En este tipo los generadores vienen provistos de cubiertas especiales de intemperie para ser instalados al exterior junto al equipo de elevación.

Para la selección de uno de estos tipos se ha  
cen estudios económicos que incluyen el examen de las condi -  
ciones meteorológicas del sitio, movimientos sísmicos o inun -  
daciones y problemas estructurales; así como de la incidencia  
del período de construcción y de las facilidades para los tra  
bajos de mantenimiento futuros. Generalmente, cuando las con  
diciones meteorológicas son severas se adopta el tipo de inte  
rior. En cambio, si existe la posibilidad de sismos el tipo  
semi-interior o el exterior son ventajosos. Desde el punto -  
de vista económico, si las condiciones meteorológicas y las  
crecientes lo permiten el tipo exterior es el más conveniente.

### 4) Centrales subterráneas

En la época actual hay una creciente tenden -  
cia a adoptar este tipo de centrales, pues los progresos re -  
cientes en la técnica de construcciones subterráneas permite  
aprovechar sus ventajas en forma económica; por lo tanto, sien  
do éste el factor determinante, las centrales subterráneas se  
pueden adoptar en los siguientes casos:

-Por requerimientos de las condiciones geológicas y topográficas del terreno. Se da este caso cuando se presentan dificultades técnicas o la construcción de una central superficial se vuelve antieconómica en razón de la configuración del terreno o la calidad del suelo.

-En caso de que la construcción de una central subterránea mejore las condiciones técnicas del proyecto o lo haga económicamente ventajoso. Por ejemplo, como se ven en el gráfico 5.6, figura 1, es posible eliminar la vía de carga que de hecho es una conducción bajo presión, eliminar el tanque de equilibrio, y construir una central subterránea adyacente a la presa, prolongando la vía de descarga que por ser un conducto sin presión o a baja presión resulta más económico.

-Cuando existan condiciones atmosféricas rigurosas en el sitio del proyecto, como fuertes heladas o nevadas y deslizamientos de tierra o nieve.

Algunas centrales subterráneas tienen solamente las unidades de generación ubicadas en el subsuelo, mientras otras pueden tener inclusive la subestación y el patio de maniobras.

Al diseñar una central subterránea es necesario minimizar el volumen de excavación de la casa de máquinas, dimensionando el edificio en la forma más reducida posible. Puesto que en el subsuelo se presentan pocas restricciones es posible un diseño relativamente libre, pudiendo darse el caso

Gráfico 5.6

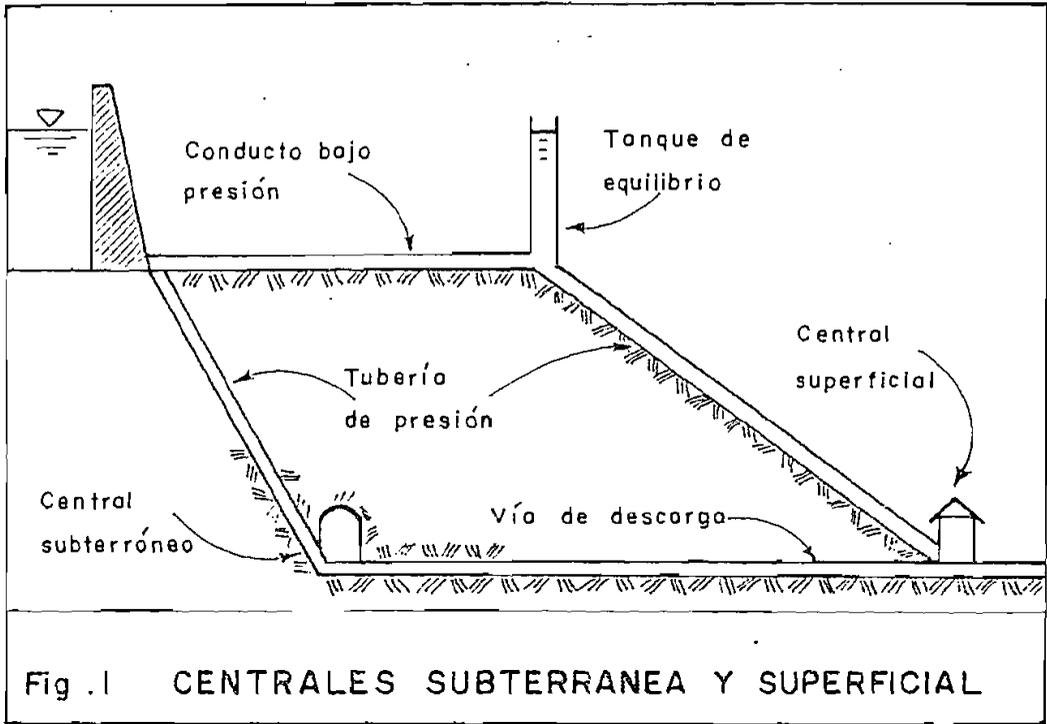


Fig. 1 CENTRALES SUBTERRANEA Y SUPERFICIAL

de terrenos rocosos de condición favorable que permitan eliminar el revestimiento de las paredes laterales y el cielo raso. En otros casos sin embargo, puede ser necesario diseñar doble pared para prevenir las filtraciones de agua. En general, utilizar una forma especial de los túneles de excavación puede facilitar los trabajos civiles y reducir el costo de la obra.

Como punto negativo de este tipo de centrales se puede mencionar la dificultad de eliminar en forma espontánea el calor o la humedad que se producen en su interior, siendo necesario dotarlas de grandes sistemas de ventilación y aire acondicionado para mantener la temperatura y las condiciones ambientales adecuadas para los equipos de control, protección, instrumentería y las personas.

b) Clasificación de acuerdo a la forma de instalación de las unidades generadoras.

Como se sabe, en las centrales que cuentan con apreciable caída y pequeña descarga en relación a la caída son aplicables las turbinas Pelton o Francis de tamaño reducido y eje horizontal; en otros casos se aplica la construcción de las unidades con eje vertical; y el tipo de casa de máquinas varía de acuerdo a esta condición. En el segundo caso, cuando la unidad es de eje vertical, la construcción de la casa de máquinas se clasifica del siguiente modo, de acuerdo a la forma de instalación con respecto al piso de generadores, sin perjuicio de que puedan existir diferentes tipos con variantes que

se aparten de la clasificación:

1) Tipo de un solo piso. En este tipo el peso de la unidad de generación se soporta en una estructura de forma cilíndrica - que se asienta en el piso de turbinas, hecho que no da lugar a la existencia del piso de generadores. La carga actuante sobre dicha estructura es una fuerza de compresión, por lo cual la construcción es adecuada especialmente para unidades de gran capacidad o unidades de gran tamaño a baja velocidad, pues es razonable y económica como una estructura soportante. Como no existe piso de generadores se hace necesario proveer a la central de un puente que permita trabajar sobre los generadores y manipular los equipos accesorios.

2) Tipo de dos pisos. En este tipo está presente el piso de generadores. Su adopción es económica y conveniente cuando - los generadores están soportados a base de vigas transversales, aunque también suele emplearse cuando la unidad se soporta en forma axial, con la finalidad de crear un doble piso que provea de un área efectiva doble para la ubicación de equipos auxiliares.

En algunos casos el piso de generadores se diseña tan alto como la parte más alta de éstos, quedando el espacio libre determinado por las necesidades de movilización de los equipos en el montaje, u otros problemas constructivos relativos a la maquinaria o los equipos auxiliares.

3) Tipo de pisos múltiples. Este tipo es poco usado en la ac-

tualidad y se lo emplea para centrales generadoras con altos niveles de agua en la descarga, de tal modo de ubicar a los generadores en un nivel superior.

Los gráficos 5.7 y 5.8 y 5.9 muestran esquemas de una central superficial de un solo piso, una central subterránea de dos pisos y una central subterránea de pisos múltiples.

c) Planeamiento de la distribución interna de la central

1) Sala de turbinas y sala de generadores

La altura de montaje de las turbinas de reacción se decide, como se sabe, en consideración de la altura de cavitación; en tanto que para las turbinas Pelton, la altura del rotor se determina en consideración del máximo nivel de agua en la descarga. En el caso de unidades de generación con eje vertical, la altura del piso de la sala de turbinas, la longitud del árbol de la unidad completa y la altura de instalación del generador, están determinadas por el tipo de construcción y las dimensiones de turbina y generador, pues estos determinan el espacio necesario para las inspecciones, ensamblaje y desmontaje de la turbina y la altura de fundación de la estructura soportante de la carga. Igualmente, la distancia entre una y otra unidad está dada por el tamaño de la turbina, esto es, por el espacio necesario para el flujo del agua. Además, las dimensiones de la casa de máquinas se determinan por el tamaño y disposición de la válvula de en







trada y el espacio necesario para la conexión con la tubería de presión, o sea la longitud de la extensión de la carcasa de la turbina. Solo en casos excepcionales interviene en el dimensionamiento el tamaño del generador.

Con respecto a la altura de la sala de generadores influye el método de ensamblaje que se va a emplear, particularmente aquel de suspensión del rotor con el eje, el mismo que determina la altura de la estructura soportante del puente grúa, su capacidad, tipo y tamaño y finalmente la altura total del edificio.

En la sala de turbinas se localizan, aunque no necesariamente, el regulador de velocidad, el panel de control de la turbina, el sistema hidráulico de control, la válvula de entrada del agua y según se requiera, los equipos auxiliares a coplados a la turbina o sus mecanismos.

## 2) Tramo de montaje

Como parte del piso de generadores, o en caso de no haberlo, del piso de turbinas, se diseña un espacio libre con el propósito de soportar la maquinaria durante el montaje y posteriormente en las inspecciones de mantenimiento o reparaciones. El tramo previsto para tal objeto debe tener un área suficiente para contener los diferentes elementos de u na unidad durante el ensamblaje, e inclusive han de preverse los lugares en que se han de almacenar los componentes más pe-

sados como el estator, el rotor, el soporte superior, la excitatriz, el rodete, el eje, etc. Debe considerarse además el espacio vertical necesario para la movilización de estos elementos dentro de la casa de máquinas mediante el gancho de la grúa, poniendo especial cuidado en las dimensiones del ensamble rotor-eje y su movilización durante los montajes y desmontajes.

Desde el punto de vista estructural hay que considerar también las condiciones de carga de este espacio durante los períodos de montaje, que como se puede apreciar son las más críticas que se presentan, pues a más de los elementos mencionados deben soportar un sinnúmero de equipos auxiliares, equipos de montaje, herramientas, etc. Concomitantemente se determina la dimensión suficiente de la entrada, tal que permita el ingreso de los bultos con el equipo y el vehículo que los transporta. Se extiende esta precaución a dar instrucciones a los fabricantes sobre los volúmenes y pesos límites de los bultos que van a transportarse y que tienen relación con la carga admisible de la construcción, como la de las carreteras de acceso, puentes, etc.

### 3) Sala de control

La sala de control contiene los tableros de control y los escritorios de control cuyas características, número y disposición varían de acuerdo a la clase o importancia de la

central. Estos son generalmente de tipo compacto y su distribución se hace en consideración al menor espacio posible y a la facilidad de observación y maniobra del operador debido a la conveniencia del mando centralizado.

En los sistemas empleados modernamente es usual que el control de toda la central esté en manos de un solo hombre, lo cual no hace indispensable la supervisión directa sobre las turbinas o los generadores desde la sala de control. Por otra parte, teniendo en cuenta la longitud de los circuitos de control y su gran número en los sistemas automatizados, es significativo localizar la sala de control cercana a las turbinas y generadores tanto como sea posible y en el mismo nivel que el piso de estos últimos. Además, teniendo en cuenta que en las centrales grandes inciden los mismos factores con respecto a la sala de equipos eléctricos y al patio de maniobras, cuyos propósitos son los de protección, mediciones y comunicaciones, es aconsejable que la sala de control esté situada en el lado de la casa de máquinas que da al patio de maniobras.

El cuarto de control debe diseñarse de modo que sea apropiado para el número y tamaño de paneles que contemple el proyecto final, puesto que generalmente las centrales de gran escala se diseñan por etapas de construcción. Y aún en el caso de centrales de control remoto, como suelen ser algunas de las que modernamente se proyectan, es también necesario proveerlas de cuartos de control en consideración de emer

gencias, pruebas, etc.

#### 4) Sala de equipos eléctricos

Los equipos eléctricos principales y auxiliares para control y maniobra de los generadores, como son, barras, suiches desconectores, interruptores, transformadores de medida, transformadores del servicio estación, equipo de excitación, regulador de voltaje y resistencia o transformador de puesta a tierra del neutro, se encuentran comunmente ubicados juntos en una sola sala, separada del resto de dependencias de la central, pero preferentemente junto a la sala de generadores. En muchos casos estos equipos están armados en paneles cerrados llamados cubículos y son instalados en una parte del piso de generadores. Este último sistema simplifica el diseño de la casa de máquinas y da algo más de seguridad a los propios equipos.

En esta sala pueden ubicarse además los centros de control de motores, cuadros de control de los transformadores, centro de distribución de fuerza para el servicio de la estación y panel de control de frecuencia en caso de haberlo.

#### 5) Galería de equipos auxiliares de la turbina

Todos los equipos auxiliares que tienen conexión con el control de la turbina y la válvula de entrada, siendo el principal el regulador automático de velocidad o gobernador, se ubican en esta galería llamada también galería de válvulas. En ella se encuentran las bombas de suministro de aceite

para el sistema hidráulico de comando de la turbina y la válvula de entrada, los sumideros o tanques reservorios de aceite, los mecanismos de control y sus respectivos paneles o tableros. Su localización debe ser en lo posible junto o por debajo del piso de turbinas, pero tiene relación con el entubado de distribución de aceite, aire y agua de la estación y con el sistema que se adopte para controlar la turbina.

En el caso de que esta galería se encuentre por debajo del piso de turbinas se instalan en ella además las bombas de drenaje del agua de servicio y las bombas de desagüe del tubo de aspiración y de la tubería de presión.

Pueden también algunos de los equipos mencionados y principalmente el regulador de velocidad ubicarse en otros niveles que no sean el de las turbinas, pero esto depende, como se dijo, del sistema de control adoptado para la unidad, el mismo que puede requerir de la supervisión de los encargados de la operación.

Suele haber en la galería de válvulas tendencia a la humedad por las filtraciones de agua y el ambiente propio para la condensación de vapor, por lo que se requiere adoptar medidas que impidan que la humedad afecte a las instalaciones propias o adyacentes.

#### 6) Otros equipos auxiliares

Para la operación de una central se requieren de otros equipos auxiliares, eléctricos, mecánicos o de suminis

tro, que deben ubicarse indistintamente de acuerdo a su uso y conveniencia. A continuación se dan algunos ejemplos.

El equipo extinguidor de incendios de los gene radores, a base de dióxido de carbono, debe ubicarse junto a los generadores.

El banco de baterías estacionarias y rectifica dores de corriente que forman el equipo de suministro de corriente continua para los sistemas de protección y control de la cen tral, debe ubicarse en un lugar no muy alejado de los tableros de control, pero convenientemente dispuesto para recibir suministro de agua y tener facilidades de drenaje. Sin embargo de que se usan baterías de tipo sellado, es necesario prevenir la diseminación de los gases, por lo que la sala debe tener un ade cuado sistema de ventilación.

Algunas centrales cuentan con tanques internos de almacenamiento y equipo para purificación de aceite, y estos deben ir ubicados en una sala que tenga relación con los equi pos a los cuales han de ir las tuberías de distribución.

El sistema de aprovisionamiento y eventualmente de tratamiento de agua se ubica por lo general en o junto a la galería de válvulas para evitar las conducciones de alta presión y los problemas de humedad.

El taller y sala de herramientas deben ubicarse en lo posible adyacentes al tramo de ensamblaje y a su misma e levación por razones de transportación de piezas y equipos.

7) Otras características de la casa de máquinas.

En cuanto a la facilidad que la central debe brindar para la operación y el mantenimiento debe pensarse en la conveniencia de la ubicación de los transportadores de cables, oficinas, equipos de fuerza de emergencia, etc. Cuando se diseña la estructura de la casa de máquinas habrá de tenerse muy en cuenta la ubicación de las columnas, escaleras, etc, de modo de no interferir las rutas de cables de control, cables de fuerza, barras, tuberías, vías de movilización emergentes, etc.

8) Subestación y patio de maniobras.

Los transformadores de la subestación se instalan usualmente en el exterior de la casa de máquinas, pero habrá que tender a que la distancia que los separa de los generadores sea la menor posible, particularmente en las unidades de gran capacidad, pues los beneficios de la reducción de las pérdidas en las barras son apreciables, habida cuenta de la relativamente baja tensión que se emplea en la generación. Para cumplir esta finalidad puede darse el caso de tener que instalar los transformadores en el interior de la casa de máquinas, especialmente en las centrales subterráneas en que puede no haber facilidad de localización cercana. Pero si la unidad de generación no es de elevada capacidad, puede decirse que menor de 30 MW, en muchos casos resultará más económico instalar el transformador en el exterior que preparar el espacio para alber

garlo en el interior de una central subterránea.

La interconexión del transformador con el patio de maniobras suele hacerse en forma aérea por ser la más económica, particular que debe tenerse en cuenta para decidir sobre la ubicación de los transformadores.

La localización del patio de maniobras depende generalmente de la configuración del sitio circundante a la casa de máquinas. Muchas veces no existe flexibilidad para escoger, pero es deseable localizarlo lo más cerca posible, y si las condiciones lo permiten, al mismo nivel que la casa de máquinas. Si no existen sitios disponibles en la vecindad o solo se contaran con estrechos espacios libres como suele ocurrir, el patio de maniobras puede instalarse en la cubierta, o en sentido vertical sobre estructuras metálicas de varios pisos, métodos que presentan el inconveniente de difícil mantenimiento e imponen restricciones para ampliaciones o modificaciones futuras. El gráfico 5.10. muestra un esquema de una central semi subterránea con la subestación y el patio de maniobras en la cubierta.

d) Selección del número de unidades

La potencia de salida de una central hidroeléctrica se obtiene reduciendo de la potencia teórica las eficiencias de la turbina y el generador. La potencia teórica a su vez es función directa de la caída efectiva y la descarga de la central en la forma determinada por la siguiente relación:

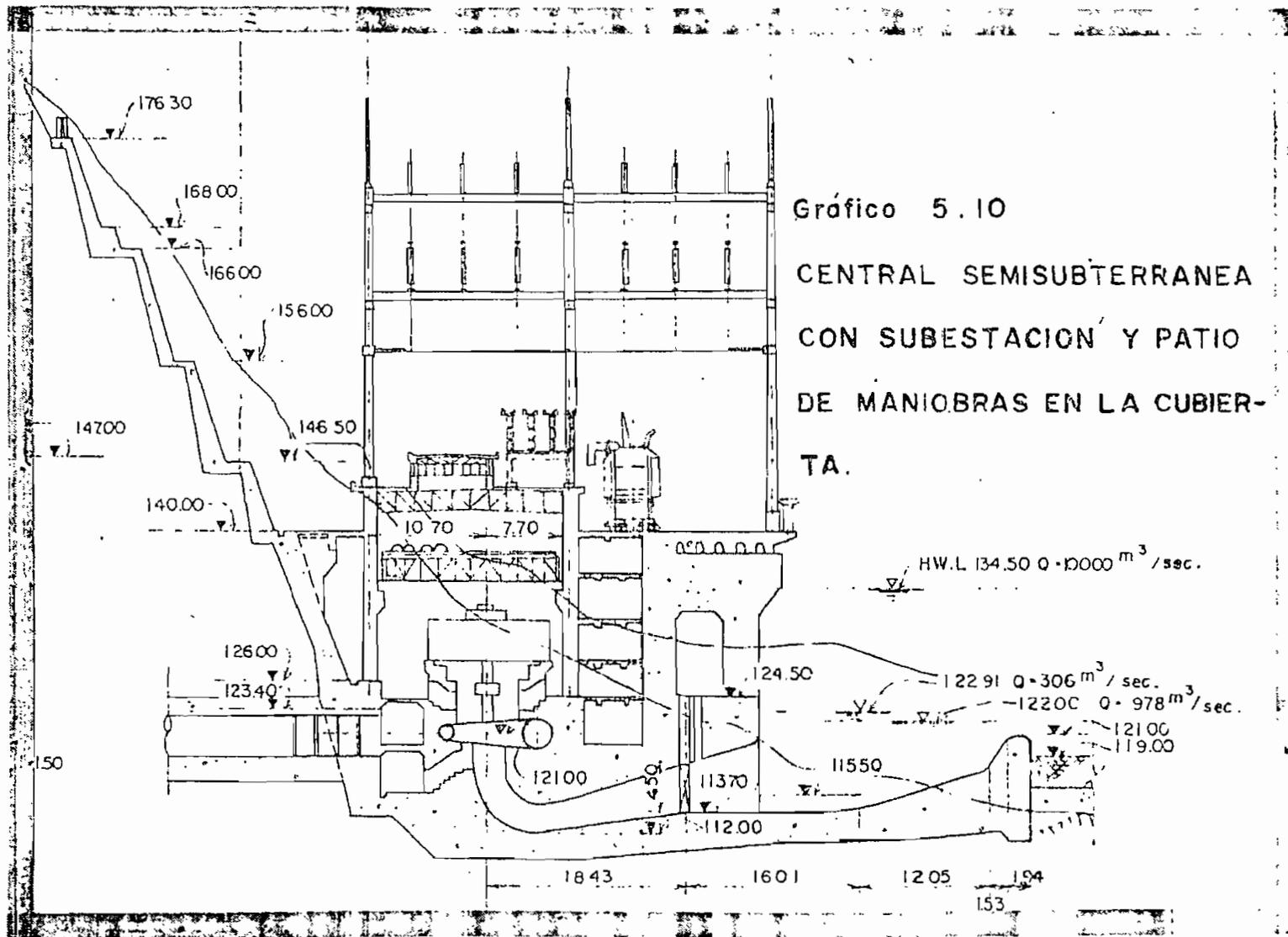


Gráfico 5.10  
 CENTRAL SEMISUBTERRANEA  
 CON SUBESTACION Y PATIO  
 DE MANIOBRAS EN LA CUBIER-  
 TA.

$$P_t \text{ (Kw)} = 9,8 \cdot H \text{ (mts)} \cdot Q \text{ (m}^3\text{/seg)}$$

Siendo las eficiencias de la turbina y generador  $Y_t$  y  $Y_g$  respectivamente, la potencia en los terminales del generador está dada por la conocida igualdad:

$$P_g = 9,8 \cdot H \cdot Q \cdot Y_t \cdot Y_g$$

Esta potencia del generador o grupo de generadores corresponde a la potencia de salida de la central.

La capacidad de una planta hidráulica está dada por la máxima potencia de salida y la energía que es capaz de generar anualmente. No obstante, la potencia de salida y la energía generada varían ampliamente y en forma muy complicada con relación a la abundancia o carencia de agua, al nivel del agua en el tanque de carga o reservorio, a la capacidad de regulación, etc, no solamente en cuanto estas variaciones afectan directamente a los parámetros que determinan la potencia teórica, sino también indirectamente a las eficiencias de la turbina y el generador. Por estas razones se requieren varias definiciones y aclaraciones cuando se habla de la potencia de salida de una central, como puede deducirse del estudio del anexo 5.1.

Para el caso en que se requiera un valor de aproximación de la potencia de salida, sin entrar en consideración de los factores que intervienen en su determinación, pue-

den usarse las siguientes igualdades;

- Unidades menores a 10 Mw,  $P_g = 7,5 H \cdot Q$
- Unidades entre 10 Mw y 50 Mw,  $P_g = 8,0 H \cdot Q$
- Unidades mayores a 50 Mw,  $P_g = 8,5 H \cdot Q$

Con el aumento de la confiabilidad en el funcionamiento de las unidades de generación y el desarrollo de los sistemas automatizados y de control remoto de los últimos tiempos, así como por la tendencia creciente a mejorar las ventajas económicas en la utilización de un recurso hidroelétrico, el número de unidades que se proyecta para las centrales tiende a ser cada vez menor.

Un número reducido de unidades en una central trae ciertamente muchas ventajas, pero presenta igualmente algunos inconvenientes. De unas y otros se pueden citar los siguientes:

#### 1.- Ventajas

- El costo de las unidades de generación es comparativamente más bajo.
  - Los equipos asociados a las unidades de generación, como tuberías de presión, interruptores, etc, se simplifican y su costo total se reduce.
  - Las eficiencias de las turbinas y generadores son relativamente más altas con el incremento de la capacidad.
-

- La operación de pocas unidades de generación se vuelve menos dificultosa y apropiada para control remoto.
- Las probabilidades de ocurrencia de fallas y accidentes se reduce.
- Los gastos de operación y mantenimiento son menores
- El período de montaje se acorta

## 2.- Inconvenientes

- En los períodos de baja descarga del río, en las plantas a circulación natural, la eficiencia de la central se reduce pues una o más turbinas trabajan a baja carga. (En las plantas con estanque de regulación o reservorio esta disminución de la eficiencia puede controlarse si trabajan con cierta libertad para escoger la carga adecuada a las eficiencias de las turbinas).
- La disminución de la capacidad es mayor en los períodos de mantenimiento prolongados o por fallas en las unidades.
- La capacidad del puente grúa es mayor mientras más grandes son las unidades.
- El transporte de unidades de gran tamaño presenta ciertas dificultades.

Como puede apreciarse, los inconvenientes que se presentan al adoptar un número reducido de unidades son fácilmente subsanables y no se comparan con las ventajas, las cuales como se ve, pueden tener una incidencia notable en la e

conomía del proyecto. Desde este punto de vista, lo deseable sería adoptar unidades tan grandes como sea posible o lo permitan las características del aprovechamiento y las facilidades constructivas de los fabricantes. Sin embargo, esta solución tropieza con la preponderancia que unidades de tal tamaño pueden tener en los sistemas. Si es tan grande su capacidad que una salida de servicio por falla o emergencia no puede ser sostenida por el resto del sistema, entonces estará en peligro su estabilidad y hasta la continuidad del servicio.

Como medida conciliatoria que ha sido empleada ampliamente en otros países se aconseja que, al diseñar las unidades de generación, se hagan todo lo grandes que sea posible pero que no sobrepasen el valor de la capacidad de sobrecarga del sistema; esto es, en concordancia con los valores normalizados de sobrecarga de los generadores, un 10 %.

#### e) TURBINA

Las turbinas hidráulicas son susceptibles de clasificarse en muy variadas formas, en relación con sus características constructivas, su forma de instalación, su aplicabilidad, su alcance, etc, todas las cuales se ensayan cuando se establece comparación entre tipos diferentes que pueden ser factibles de aplicarse a un proyecto cualquiera. Para fines de estudio la clasificación más importante podría ser aquella hecha desde el punto de vista hidrodinámico, la misma

que las divide en turbinas de acción o impulso y turbinas de reacción.

De las turbinas de acción existe un solo tipo conocido de características muy definidas, las turbinas "Pelton", en tanto que entre las turbinas de reacción hay varios tipos que pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Turbinas "Francis"
- Turbinas de propulsor o hélice y flujo rectangular
- Turbinas de propulsor y flujo diagonal
- Turbinas de propulsor y flujo axial

Cuando las turbinas de flujo rectangular tienen las aletas del rotor móviles, toman el nombre de "Kaplan"; si las que tienen aletas móviles son las de flujo diagonal, entonces se llaman "Dériaz"; en tanto que a las turbinas de flujo axial se las conoce como turbinas tubulares.

Una forma muy usada para clasificar a las turbinas tiene relación con el rango de caída dentro del cual pueden ser aplicables y se refiere por lo general a los tipos de turbinas más usados y conocidos que son los siguientes:

- Para caída pequeña, turbinas Kaplan y turbinas tubulares
- Para caída mediana, turbinas Francis y turbinas Dériaz
- Para caída grande, turbinas Pelton

Los límites entre los cuales un tipo determinado de turbina puede ser usado no se hallan matemáticamente de-

---

finidos, pero pueden establecerse ciertos valores de referencia basados en datos estadísticos de las soluciones más comunmente adoptadas en diversas utilizaciones. Estos son:

Tipo de turbina	Límite superior	Límite inferior
Pelton	—	200 mts
Francis	500 mts	50 mts
Dériaz	100 mts	—
Kaplan	80 mts	—
Tubular	30 mts	—

La influencia que la altura de la caída puede tener en la selección de un tipo determinado de turbina no es definitiva, pues en dicha selección intervienen otros factores tan importantes como la potencia de salida y la velocidad, para relacionar los cuales, se usa la característica conocida como "velocidad específica". Aún más, la aplicabilidad de un tipo general de turbina se halla condicionada a ciertos otros aspectos físicos de la máquina, como son el número de rodete, la forma de la carcasa o la dirección de los ejes, detalles que se discutirán más adelante.

#### 1) Velocidad específica.

La velocidad específica de una turbina se define del siguiente modo:

"Cuando una turbina se somete a una caída unitaria y ésta rinde una potencia unitaria manteniendo la misma

forma de su rodete, pero cambiando sus dimensiones, la velocidad que toma es la velocidad específica de la turbina original"

Nota: Las velocidades específicas que se mencionen en adelante estarán referidas a las unidades (mts) y (Kw)

Como se puede colegir, la velocidad específica sirve de medida para la estimación de las características y la forma que deben tener los rodetes de las turbinas, lo que quiere decir que las dimensiones con que se diseñe un rodete dependerán de las fluctuaciones de la caída, del caudal, de la potencia de salida y de la velocidad adoptados, que son factores que determinan la velocidad específica.

La velocidad específica se calcula a base de la siguiente ecuación:

$$N_s = N \cdot \frac{P^{1/2}}{H^{5/4}}$$

en donde,

N = Velocidad de la turbina (RPM)

H = Caída efectiva (Mts)

P = Potencia de salida por rodete en las turbinas de reacción y por inyector en las turbinas de impulso. (Kw)

La velocidad específica de las turbinas determina su velocidad de giro e indirectamente determina caracte-

rísticas como el tamaño del generador que influyen en la economía del diseño. El valor de la velocidad específica en las turbinas varía con las condiciones bajo las cuales van a ser usadas, el diseño, el material, la altura de montaje, etc, por lo que para adoptar una determinada velocidad deben tenerse en cuenta ciertas limitaciones que dependen del tipo de turbina y de la caída, y que tienen relación directa con los problemas de cavitación que afectan grandemente la eficiencia y la duración de las máquinas. Estos límites se han determinado en forma experimental y están dados por las siguientes igualdades:

Turbinas Pelton:	Ns menor a	$\frac{25.000}{H + 800}$
Turbinas Francis:	Ns menor a	$\frac{20.000}{H + 20} + 30$
Turbinas Dériaz:	Ns menor a	$\frac{20.000}{H + 20} + 40$
Otras turbinas de propulsor:	Ns menor a	$\frac{20.000}{H + 20} + 50$

## 2) Velocidad de giro

La velocidad de giro se decide no solo teniendo en cuenta los factores mecánicos de la operación como la vibración, la temperatura de los cojinetes, la lubricación del pivote, o los esfuerzos en el rotor del generador, entre los más importantes, sino también con relación a la economía del proyecto que está dado por el tamaño y tipo de construcción de la casa de máquinas, o el costo de la unidad turbina generador.

Obtenido el límite de la velocidad específica con relación a la caída en la forma indicada puede calcularse la velocidad de giro de referencia mediante la fórmula dada para el cálculo de la velocidad específica. Esta velocidad de referencia se compara con las velocidades típicas de los generadores que se construyen de acuerdo al número de polos y la frecuencia.

Como generalmente se diseña el generador directamente acoplado a la turbina, sus velocidades deben ser iguales y caer dentro de valores establecidos, dados por la siguiente fórmula, en la cual la frecuencia es fija y el número de polos solo varía de dos en dos.

$$N = \frac{120 \times \text{frecuencia}}{\text{Número de polos.}}$$

De acuerdo a esta fórmula se ha podido establecer la tabla que consta en el anexo 5.2 y que muestra las velocidades normalizadas más comunes entre los fabricantes de equipo para la frecuencia industrial de 60 ciclos.

### 3) Eficiencia de las turbinas

La eficiencia de una turbina varía de acuerdo a su velocidad específica, a su capacidad, a su tipo, pero principalmente varía con la carga. Un grupo de características para diferentes tipos de turbinas de capacidad similar,

de alrededor de 50 Mw, y de diferentes velocidades específicas se muestra en el gráfico 5.11, figura 1.

Como se puede ver en dicho gráfico, la eficiencia se reduce en muy pequeña magnitud cuando están con carga parcial las turbinas Pelton, Dériaz o Kaplan, en tanto que en las turbinas Francis, y en forma más pronunciada en las turbinas de propulsor y aletas fijas, la reducción de la eficiencia bajo condiciones de carga parcial se vuelve notable cuando la velocidad específica se aparta de cierto valor característico de óptima eficiencia. Como se ve, el punto más alto de la curva de eficiencia está más bajo cuando la velocidad específica es excesivamente alta o excesivamente baja.

#### 4) Altura de succión

En las turbinas Francis, Dériaz y Kaplan se dispone un tubo a la descarga del rodete con el fin de minimizar las pérdidas en la salida del agua y de usar efectivamente la caída con respecto al nivel de agua en la descarga. Desde el punto de vista de prevención contra las crecientes y para evitar que la excavación de la casa de máquinas tenga que hacerse en forma profunda, lo cual aumenta los costos de construcción y ocasiona inconvenientes para la inspección del rodete, es deseable que las turbinas sean instaladas lo más alto que sea posible. No obstante, aumentar la altura de succión más allá de un cierto valor incrementa la depresión que se produce a la salida del rodete, causando cavitación, vibración, pérdida de e-

blecida.

### 3) Equipo de protección contra incendios

En la protección contra los incendios que pueden producirse en las cámaras o fozas que encierran a los generadores se emplea comunmente extinguidores de tipo estacionario a base de CO<sub>2</sub>, los mismos que son puestos en funcionamiento por medio de relés térmicos operados por la elevación de la temperatura producida por fallas internas importantes que generan calor o por el fuego cuando éste ya se ha declarado.

Este sistema de protección es usado en los generadores de tipo cerrado, debiendo mantenerse la concentración de CO<sub>2</sub> en un cierto nivel no inferior a 25 % del aire, para lo cual se emplean relés con retardo y diferentes etapas de operación de los dispositivos disparadores de los extinguidores. Por esta misma razón se requieren de grandes cantidades de gas que debe ser almacenado en lugares separados de la unidad protegida.

Los equipos eléctricos auxiliares se protegen con extinguidores portables de tipo seco, a base de tetracloruro de carbono, presurizados con aire o nitrógeno que son elementos que no causan daño a los aparatos y conductores. Los materiales inflamables como el aceite, y los bancos de baterías, tienen protección a base de extinguidores portables de

CO<sub>2</sub>. Otros elementos de la central pueden usar sistemas de agua a alta velocidad y gran presión por medio de hidrantes y mangueras convenientemente dispuestos y preparados para la o-  
peración de emergencia.

#### 4) Sistemas de refrigeración y ventilación

Los transformadores, estator y cojinetes de los generadores y cojinetes de las turbinas, tienen usualmente sistemas de refrigeración a base de agua que se hace circu-  
lar mediante bombas o usando directamente la presión de las tuberías de entrada a la central, convenientemente reducida y filtrada. Esta misma captación de agua sirve además para el uso de los extinguidores de incendios y la distribución de a-  
gua para usos sanitarios de la central. El agua es ocasional-  
mente tratada y potabilizada para consumo humano cuando no se tiene cerca otra fuente apropiada.

Los sistemas de ventilación son muy importan-  
tes especialmente en lugares de atmósfera contaminada pues los aparatos eléctricos y particularmente los generadores deben -  
mantenerse en ambientes libres de polvo, humedad o grasa. El aire que circula por ellos debe purificarse a la entrada me -  
diante sistemas especiales de filtrado o lavado. Este proce-  
dimiento ayuda a mantener la calidad del aislamiento y evita peligros de incendios. Las salas de control y equipos eléc -  
tricos auxiliares y los cuartos de barrajes generan abundante calor que debe ser eliminado mediante sistemas adecuados de

ventilación, lo mismo que los cuartos de baterías y de generador de emergencia cuando es impulsado por motor de combustión.

#### 5) Banco de baterías

La corriente continua suministrada por el banco de baterías estacionarias se usa normalmente para la operación de los equipos de control y protección y para el accionamiento de los interruptores; en conexión con rectificadores que trabajan sobre las mismas barras. Se usa también para suministrar energía de emergencia en la operación de las compuertas, luces y equipos auxiliares que sirven para el arranque y marcha en vacío de las unidades, como pueden ser las bombas de aceite de los reguladores de velocidad y la válvula de entrada de agua a las turbinas. Las baterías se conectan en forma de que proporcionen la tensión necesaria de operación de los equipos, que usualmente es de 120 voltios, y su capacidad debe ser tal que exceda en 10 horas la carga nominal de la central en amperios. En condiciones normales de operación de la central, éstas se hallan en situación flotante con respecto de los rectificadores, para lo cual estos últimos deben ser del tipo automático en razón de la carga variable de la central.

#### 6) Otros equipos auxiliares

El sistema de drenaje de las aguas usadas en la central sirve para extraer mediante bombas especiales el a

agua que se deposita en un pozo profundo a nivel inferior al de la descarga. Igualmente utiliza bombas el sistema de desagüe de los fozos de las turbinas y del agua de las tuberías de presión cuando se las vacía para inspecciones o reparaciones.

Los compresores de aire sirven principalmente para accionar los frenos de los generadores, pero se usan eventualmente para alimentar los sistemas de aceite a presión de los reguladores de velocidad y válvulas de control de la entrada de agua a las turbinas. Además pueden proveer de presión a ciertos sistemas de distribución de agua y aceite en pequeña escala dentro de la central y ocasionalmente para operaciones de limpieza y para algunas máquinas herramientas del taller que trabajan a base de aire.

Los sistemas de trasiego de aceite lubricante y aislante tienen centros de distribución y almacenamiento en donde se controla y purifica el aceite periódicamente mediante sistemas especiales deshumectantes y de filtrado.

#### i) SUBESTACION

Los transformadores más comunmente usados en las subestaciones de elevación de las centrales hidroeléctricas son los trifásicos tipo de intemperie, aunque en algunos casos se usan transformadores de tipo interior, especialmente cuando se quiere protegerlos contra el efecto salino de algunos ambientes, o hay fuertes precipitaciones de nieve. En es

te caso los transformadores resultan más costosos que los de intemperie, acentuándose esta diferencia mientras mayor es el voltaje.

También se usan transformadores monofásicos - teniendo en consideración la conveniencia de transporte y montaje debido a su tamaño. Otra ventaja que se puede acreditar al uso de transformadores monofásicos es el reducido costo de mantener una unidad de reserva en caso de falla de una unidad en servicio. La siguiente tabla da los costos comparativos para una capacidad total de 30 MW en diferentes casos de usar transformadores trifásicos y monofásicos, más una unidad de reserva.

Número de unidades	Número de fases	Capacidad MVA	Costo c %	Costo más reserva %
1	3	30	100	200
3	1	10	118	158
2	3	15	119	179
3	3	10	132	175

Con respecto al sistema de enfriamiento los transformadores pueden ser de las siguientes clases:

- 1.- Transformadores de tipo seco auto- enfriados y de tipo seco enfriados por aire. Estos se usan en voltajes relativamente bajos y para pequeñas capacidades.
- 2.- Transformadores sumergidos en aceite autoenfriados y transformadores con circulación forzada de aceite autoenfriados.

El más común es el primero de ellos por su estructura simple y facilidad de mantenimiento; pero para capacidades mayores de 30 MVA resulta más económica la estructura de los de circulación forzada.

3.- Transformadores sumergidos en aceite con enfriamiento por aire forzado. Este tipo de transformadores es útil especialmente en las instalaciones que trabajan con factor de carga bajo, pues posibilitan el aumento de su capacidad en un 20 o 30 % durante la acción del aire forzado, con respecto a la capacidad de autoenfriamiento, para los períodos de alta demanda.

4.- Transformadores con circulación forzada de aceite y en enfriamiento por aire forzado y transformadores con circulación forzada de aceite y enfriamiento por agua. En esta clase de transformadores se desvía el aceite aislante a un recipiente enfriador, consiguiéndose una alta eficiencia en el enfriamiento y siendo posible por tal motivo minimizar las dimensiones y el peso del cuerpo principal. Entre los dos el más usado es el de enfriamiento por aire, siendo el de enfriamiento por agua particularmente usado en instalaciones al interior por su volumen reducido y la facilidad de enfriamiento.

Especificación de los transformadores.- La capacidad normal de los transformadores de elevación en las centrales es usualmente adoptada un 10 % más alta que la capacidad de los generadores con el fin de capacitarlos para soportar las sobrecargas

de corta duración que éstos últimos pueden soportar, sin sacrificio de la duración de su vida útil probable.

El voltaje primario por el contrario se diseña un 5 % menor que el voltaje de salida de los generadores, adoptando como base de referencia el sobrevoltaje permisible de ellos. De este modo, la relación entre los voltajes de transformador y generador con respecto al voltaje nominal es de 105/110 %. No obstante, en casos en que el factor de potencia de la carga es alto, una relación cercana a la unidad como 108/110 % es razonable.

En el secundario no es usual hacer diferencias con respecto al voltaje de referencia (110 %), pues normalmente están provistos de cambiadores de derivaciones o "taps" para variar el voltaje en rangos de hasta 5 % por encima y por debajo del voltaje de salida. Durante la operación sin embargo, el cambio de las derivaciones se vuelve innecesario pues el generador por si solo ya tiene su propio rango de variación de voltaje del orden de ~~±~~ 10 %.

Los arrollamientos de los transformadores trifásicos pueden conectarse de diferentes maneras combinando las conexiones delta y estrella, pero como en las plantas hidroeléctricas la puesta a tierra del neutro es necesaria para la protección a tierra de las líneas de transmisión, se adopta comúnmente la conexión delta en el primario y estrella en el se-

cundario con el neutro puesto a tierra. En pocas ocasiones se usa la conexión delta - delta para sistemas sin puesta a tierra ó en centrales de pequeña capacidad.

Al especificar un transformador se tienen en cuenta importantes factores como el voltaje de impedancia, la eficiencia y el aumento de temperatura admisible.

El voltaje de impedancia de un transformador es el voltaje que al alimentar el transformador cuando el secundario está en cortocircuito produce la corriente nominal y se expresa normalmente en porcentaje del voltaje primario.

Este valor es conocido más simplemente como impedancia del transformador y tiene influencia determinante en la regulación de voltaje y en la estabilidad de los circuitos de transmisión conectados a él. Igualmente determina las características de los cortocircuitos, cuyas corrientes influyen en el diseño y finalmente en el costo.

Valores normalizados para transformadores de diferentes niveles de aislamiento se dan en la siguiente tabla:

Clase de aislamiento	Rango de variación	Valor estándar
KV	%	%
10	4 - 6	4,5
20	4 - 8	5,0
30	5 - 9	5,5
60	6 - 10	7,5
100	8 - 14	9,0

larlos en el interior debido a los problemas de mantener el aislamiento en las muy altas tensiones.

En el patio de maniobras se localizan también transformadores de medida importantes y de relaciones elevadas que sirven para el control de las líneas de transmisión que de allí parten y que tiene normalmente grandes capacidades y elevados voltajes. Por causa de estas mismas líneas se tiene en el patio de maniobras los elementos de protección contra sobretensiones atmosféricas llamados pararrayos. Su función es despejar los sobrevoltajes producidos por las descargas atmosféricas que pueden ser perjudiciales para los aparatos asociados a ellas como transformadores e interruptores.

El patio de maniobras puede ubicarse adyacente a la casa de máquinas cuando ésta es del tipo superficial; en la cubierta en los tipos semi subterráneos, lo cual da una gran economía de espacio; o en la salida de los ductos de cables en las centrales subterráneas.

ANEXO 5.1.

Diseño de la potencia de salida de una central.

Datos

1.- Altura máxima del reservorio	120 mts
2.- Altura normal del reservorio	105 mts
3.- Máxima descarga de diseño	110 m <sup>3</sup> /seg
4.- Descarga limitada para máxima caída	100 m <sup>3</sup> /seg
5.- Eficiencia de la turbina	0,9
6.- Eficiencia del generador	0,97

a) Potencia normal es la potencia que se obtiene con la caída normal y la descarga máxima de diseño, siendo la caída normal aquella que hace un máximo de la energía anual producida por la central.

Turbina:  $P_t \text{ normal} = 9,8 \times 110 \times 105 \times 0,9 = 102 \text{ MW}$

Generador:  $P_g \text{ normal} = 102 \times 0,97 = 99 \text{ MW}$

b) Potencia máxima es la obtenible con la caída máxima y la - descarga limitada a un cierto valor que permita una sobrecarga moderada de la potencia normal.

$$P_t \text{ máxima} = 9,8 \times 100 \times 120 \times 0,9 = 106 \text{ MW}$$

$$P_g \text{ máxima} = 106 \times 0,97 = 103 \text{ MW}$$

- c) La potencia máxima sin limitación de la descarga para máxima caída se obtiene con la máxima caída y la descarga natural que produce esa caída:

$$Q = Q_{\max} (H_{\max} / H_{\text{nor}})^{1/2}$$

$$Q = 110 (120 / 105)^{1/2} = 118 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$P_t = 9,8 \times 118 \times 120 \times 0,9 = 125 \text{ MW}$$

$$P_g = 125 \times 0,97 = 121 \text{ MW}$$

- d) Como la turbina no opera continuamente a la máxima caída, resulta antieconómico diseñar la turbina para la máxima potencia, pues en tal caso el generador tendrá una capacidad excesiva que aumentará su costo en la siguiente relación:

$$121,7 / 103 = 1,18 \quad (18 \%)$$

- e) La capacidad de diseño de la turbina se basa en su potencia normal: 102 MW
- f) La capacidad de diseño del generador se basa en la potencia máxima: 103 MW

ANEXO 5.2.

Velocidades sincrónicas normalizadas para generadores accionados por turbina hidráulica (60 Hz)

Número de polos	R.P.M.
6	1.200
8	900
10	720
12	600
14	514
16	450
18	400
20	360
24	300
28	257
32	225
36	200
40	180
48	150
56	129
64	113
72	100
80	90
88	82

## CAPITULO VI BASES Y CRITERIOS PARA LA ELABORACION DE ESPECIFICACIONES Y CONTRATACION DE LA CONSTRUCCION

En la industria de construcción hidroeléctrica los trabajos son ejecutados generalmente bajo el sistema de contratación y de acuerdo a prescripciones y normas impuestas por el contratante, e incluyen obras civiles, eléctricas, mecánicas y trabajos incidentales de los más variados. Su peculiaridad radica en que todos los trabajos son llevados a cabo en el campo, por lo que guardan estrecha vinculación con personas y propiedades particulares, involucrando de este modo aún más a los intereses públicos ya comprometidos en razón de la finalidad de estos trabajos que es el suministro de energía eléctrica.

En concordancia con estos aspectos el trabajo de ingeniería de planeamiento y diseño de las utilidades hidroeléctricas extiende su responsabilidad a las labores de preparación de la construcción y de supervisión y control en la ejecución de los trabajos, por lo que el equipo de profesionales que actúe en estas etapas del proyecto debe tener especiales características que lo capaciten para llevar a efecto sus tareas con la preparación y responsabilidad que la magnitud e importancia de esta clase de obras demanda. Dichas características pueden resumirse en las siguientes:

- Alto nivel tecnológico en general
- Especial conocimiento de las especificaciones para la construcción del proyecto y de las normas técnicas de las diferentes ramas de ingeniería.
- Conocimiento de las leyes generales, regulaciones particulares, aspectos económicos y ética de las industrias eléctrica y de construcciones.
- Conocimiento sobre organización de empresas
- Conocimiento de los costos del proyecto y del alcance de los contratos específicos de la obra.

En la preparación de la construcción y durante la ejecución de los trabajos se desarrollan diferentes actividades que tienen decisiva influencia en el éxito del proyecto, especialmente cuando debe ejercerse control de obras - que se realizan mediante sistemas de contratación y cuando se trata de seleccionar al contratista idóneo que ha de ejecutar esas obras. Tales actividades si son correctamente llevadas permiten obtener los mejores costos posibles y acortar los plazos muchas veces diferidos por dificultades administrativas; éstas son:

- Preparación del programa de construcción
- Preparación de especificaciones
- Preparación de documentos para la oferta
- Estimación de costos
- Asesoramiento a los oferentes

- Asesoramiento en la adjudicación del contrato
- Supervisión general de la construcción
- Supervisión especial de los procedimientos
- Intervención en pruebas e inspecciones
- Supervisión de la puesta en marcha y operación inicial

#### 6.1. Sistema de contratación

Para la ejecución misma de las obras puede es cogerse entre los sistemas de administración directa y de con tratación, dependiendo de los requerimientos generales y espe ciales de la obra, de las condiciones locales del proyecto y de las posibilidades propias del organismo ejecutor para cumplir el objetivo propuesto. . En caso de adoptar el sistema de contratación puede optarse por un contrato general de toda la obra, o por contratos separados para partes específicas, o fi nalmente emplear el sistema combinado de contrato parcial y administración directa. Debe entenderse que aún en el caso - de administración directa habrá necesariamente contratación - para la adquisición del equipo electro mecánico que emplee el proyecto.

Entre los sistemas más usados para la contra tación de construcción, sea ésta parcial o total, se distin - guen los siguientes:

- Contrato a precio global
- Contrato al costo más honorarios por administración
- Contrato por precios unitarios

- Contrato por supervisión. (Consultoría)

Para seleccionar al contratista de la construcción se emplean comunmente los sistemas de concurso abierto, negociación directa, o selección entre determinadas firmas. Cada uno de estos sistemas tiene sus ventajas e inconvenientes que se derivan de la magnitud de las tramitaciones y de la incidencia de las mejoras en precios que la adopción de uno de ellos puede aportar. Es usual por otra parte plantear ciertas restricciones en cuanto a subcontratación o asociación con otras firmas, por el riesgo que la delegación de responsabilidades implica en cuanto éstas pueden dificultar el control y la supervisión de la obra.

6.2. Preparación de las especificaciones para la construcción

Para la elaboración de las especificaciones el contratante prepara los documentos que forman parte de las mismas y que son:

a) Instrucciones a los proponentes

En las instrucciones a los proponentes se hacen constar los siguientes aspectos relativos a la tramitación y contratación:

- Nombre y dirección de la persona autorizada para recibir las ofertas; lugar, fecha y hora de recepción.
- Descripción general de la ubicación, clase y características de la obra.

- Lugar en donde puede obtenerse información adicional del proyecto y donde pueden examinarse especificaciones particula - res, diseños y dibujos detallados que pueden ayudar a accla - rar los requerimientos del contratante.
- Información relativa a las grarantías que requiere el contratante.
- Lugar, día y hora de la apertura de las ofertas, y procedi - miento y fecha de la adjudicación.
- Información relativa a la evaluación y procedimiento para rechazo de las propuestas.
- Información relativa al contenido mínimo indispensable y máxi - mo necesario de las ofertas, lo mismo que el lenguaje a em - plearse y a las precauciones que deben tomarse.

En los proyectos de importancia es usual em - plear el sistema de calificación y hasta de pre - calificación de firmas, pero este procedimiento implica la obligación moral del contratante de dar a conocer los criterios empleados en la aceptación o rechazo de las firmas. Una medida que puede ayu - dar al contratante durante la selección es la de solicitar do - cumentos aclaratorios adjuntos a la oferta o de instaurar la delegación de un negociador por cada una de las firmas.

#### b) Formato de la propuesta

En el formato para presentación de la propues - ta que debe ser llenado por el oferente se hacen constar los siguientes puntos:

- Nombre y dirección de la firma oferente
- Nombre del representante legal, firma de éste y de testigos.
- Descripción breve de la materia de la oferta.
- Garantías que presenta
- Enumeración de los documentos importantes de que consta la oferta.

c) Cartilla de precios y cantidades

En la cartilla de precios se hacen constar los diferentes renglones de que consta la oferta, unidades, cantidades, precio unitario, precio total y porcentajes de moneda nacional y divisas para cada renglón.

En su preparación deben tenerse en cuenta los siguientes principios:

- 1) La materia de cada renglón debe determinarse de antemano, en forma de hacer el cálculo de las cantidades y valores para la recepción de manera clara y conveniente.
- 2) Debe considerarse la posibilidad de ajustes de precios y de cantidades por cambios de programas de trabajo sin causar problemas en la determinación de los valores finales.
- 3) El reconocimiento de pérdidas por fuerza mayor u otros conceptos puede preverse mediante la estipulación de un margen a decuado de seguridad en los precios unitarios.

d) Modelo de contrato

La presentación de un modelo de contrato tiene

la finalidad de anticipar la mutua conformidad de las dos partes durante la contratación y de prevenir las disputas relativas a reclamos posteriores de la una parte y obligaciones adquiridas por la otra. El contrato en sí debe satisfacer los siguientes requisitos que se consideran esenciales para su legal cumplimiento:

- Ser un acuerdo con cabal consentimiento de las partes.
- La materia tratada en él ser legal y lícita.
- Contemplar el reconocimiento justo por el trabajo válido.
- Cumplir con las prescripciones de forma.

La ausencia de uno de estos requerimientos puede ser suficiente para invalidar la contratación.

Los aspectos sobresalientes del acuerdo que se halla garantizado por las firmas de los representantes de las partes son: la descripción de los servicios que se ofrecen, el monto del pago por esos servicios, las fechas de iniciación y terminación de los trabajos y la lista de los documentos que forman parte del contrato.

e) Condiciones del contrato

En el contrato se fijan ciertas condiciones que detallan aspectos inherentes al acuerdo que son:

- Alcance pormenorizado
- Obligaciones del contratista
- Forma de pago

- Período de construcción, período de garantía y derechos del contratista.
- Responsabilidades por daños y perjuicios, derechos de los propietarios y seguros.
- Alteración, aumentos u omisión de trabajos y alteración de los períodos de construcción.
- Disputas y forma de reclamación.

f) Especificaciones y condiciones técnicas de la obra

Las especificaciones sirven para definir los requerimientos técnicos del contratante y complementan a los planos y dibujos del proyecto, pero se diferencian en que éstos muestran que es lo que va a hacerse, mientras que aquellas dicen como deben ser llevados a cabo los trabajos. En las especificaciones generales constan los siguientes aspectos:

- Descripción del trabajo
- Ubicación de la obra
- Características de los materiales
- Requerimientos para la mano de obra
- Equipos y maquinarias para la construcción
- Normas técnicas
- Planos y documentos de referencia
- Forma de supervisión
- Procedimientos en pruebas e inspecciones

En cuanto a las estipulaciones técnicas se usan las especificaciones normalizadas en el país y las especificaciones especiales del contratante. Las normas que comúnmente se aplican en este tipo de contratos son las internacionales por el carácter internacional de los concursos de ofertas. Entre las más empleadas se encuentran las que constan en la tabla del anexo 6.1.

El contenido de las condiciones técnicas en los trabajos de proyectos hidroeléctricos es generalmente el siguiente:

- Tratamiento del río
- Métodos de excavación y perforación
- Métodos de embanque
- Técnicas en el hormigón
- Trabajos en mampostería, acabados y pintura
- Manufactura e instalación de equipos y maquinaria
- Trabajos en metales
- Trabajos miscelaneos.

ANEXO 6.1.

Tabla de las normas técnicas internacionales más usadas en las especificaciones de los proyectos hidroeléctricos.

Internacionales

ISO International Organization for Standardization

IEC International Electrotechnical Commission

Estados Unidos

FS Federal Specifications

ASA American Standards Association

ACI American Concrete Institute

AISC American Institute of Steel Construction

ASME American Society of Mechanical Engineers

ASTM American Society for Testing and Materials

AWWA American Water Works Associations

AIEE American Institute of Electrical Engineers

EI Edison Electric Institute

NEMA National Electrical Manufacturers Association

Inglaterra

BS British Standards

Unión Soviética

GOST

Alemania

DIN Deutsche Normen

Francia

NF      Normalization Francaise

Italia

UNI     Unificazione

Japón

JIS     Japan Industrial Standards

## BIBLIOGRAFIA

Hydrology

Chester O. WISLER

John Wiley and Sons, 1.959

Hidrologia para Ingenieros

Ray K. LINSLEY

Mc. Graw-Hill Book Co., 1.967

Handbook of Applied Hydrology

Ven Te CHOW

Mc. Graw-Hill Book Co., 1.964

Water Supply and Waste Water Disposal

Gordon Maskew FAIR

John Wiley and Sons, 1.954

Handbook of Applied Hydraulics

Calvin Victor DAVIS

Mc. Graw Hill Book Co., 1.952

Saltos de Agua y Presas de Embalse

José Luis GOMEZ NAVARRO

Tipografía Artística, 1.952

Centrales Eléctricas

Frederick MORSE

Cia. Editorial Continental S.A., 1.961

Generating Stations

Alfred LOVELL

Mc. Graw-Hill Book Co., 1.951

Electric Generation

Bernhardt SKROTZKI

Mc. Graw-Hill Book Co., 1.956

Hydroelectric Handbook

William CREAGER

John Wiley and Sons, 1.950

Centrales y Redes Eléctricas

Th. BUCHHOLD y H. HAPPOLDT

Editorial Labor, 1.959

Power Station Engineering and Economy

Bernhardt SKROTZKI

Mc. Graw-Hill Book Co., 1.960

Manual "Standard" del Ingeniero Electricista

Archer E. KNOWLTON

Editorial Labor, 1.962

Guía para la Elaboración de Proyectos de Pequeñas Centrales

Hidroeléctricas Destinadas a la Electrificación Rural del Perú

Tsuguo NOZAKI

Cooperación Técnica Japonesa, 1.968