



27
291.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**" CONSTRUCCION DE UNA PRESA
HIDROELECTRICA "**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
GRACIELA LILIANA CARDENAS GARCIA



MEXICO, D.F.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1997



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIAS:

A DIOS POR REGALARME EL DON MAS PRECIADO: LA VIDA.

DEDICO ESTE TRABAJO A MIS PADRES, DANIEL CÁRDENAS CHIMAL Y MAURA GARCÍA DE CÁRDENAS POR SU APOYO, CARIÑO Y SEGURIDAD QUE SIEMPRE ME BRINDARON.

A MIS HERMANOS, DANIEL, SERGIO RAMON, TERE, MAURA, MARTHITA POR SU PACIENCIA, COMPRENSION Y POR SER LOS MEJORES HERMANOS QUE PUDE HABER TENIDO

A MI MEJOR AMIGO, AGUSTÍN ARREOLA POR TODAS LAS EXPERIENCIAS COMPARTIDAS A LO LARGO DE NUESTRA CARRERA.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-020/96

Señores
AGUSTIN ARREOLA PLATA
GRACIELA LILIANA CARDENAS GARCIA
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. MIGUEL MORAYTA MARTINEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"CONSTRUCCION DE UNA PRESA HIDROELECTRICA"

- I. INTRODUCCION
- II. ESTUDIOS PREVIOS
- III. CONSTRUCCION DE UNA PRESA HIDROELECTRICA
- IV. EJEMPLOS
- IV. CONCLUSIONES

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberán prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

A t e n t a m e n t e
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitario, a 6 de febrero de 1996.
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

MCS:GMP*nh

CONSTRUCCIÓN DE UNA PRESA HIDROELÉCTRICA

INDICE

	pag
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. ESTUDIOS PREVIOS	7
I.1 Estudios Geológicos	8
I.1.1 Geología general	8
I.1.2 Tectónica	15
I.2 Estudios Topográficos	30
I.2.1. Geometría de la cuenca	30
I.2.2 Geometría de la boquilla	32
I.3 Estudios Hidrológicos	33
I.3.1 Arrea de la cuenca	33
I.3.2 Escurrimientos	39
CAPÍTULO II. CONSTRUCCIÓN DE UNA PRESA HIDROELÉCTRICA	43
II.4. Vaso de almacenamiento	44
II.4.1 Elevaciones: NAMO, NAMINO, NAME	44
II.4.2 Capacidad útil: NAMO-NAMINO	49
II.4.3 Capacidad para control de avenidas: NAME-NAMO	51
II.4.4 Tipo de cortina	64
II.5. Obra de Desvío	72
II.5.1 Cierre de cauces	72
II.5.2 Ataguias aguas arriba y aguas abajo	73
II.5.3 Túnel o la propia obra de desvío	76
II.6. Obra de Excedencias	78
II.6.1 Vertedor	78
II.7. Obras de Generación de Energía	84
II.7.1 Obra de toma	84
II.7.2 Túnel de conducción	85
II.7.3 Pozo de oscilación	86
II.7.4 Tubería a presión	90
II.7.5 Casa de máquinas	92
CAPÍTULO III. EJEMPLOS	96
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES	114
BIBLIOGRAFÍA	119

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN:

Siempre ha sido la energía la llave de las grandes metas de la humanidad y de su sueño de un mundo mejor. Se ha dicho que el hombre de las cavernas inició la ruta de la civilización después de utilizar la energía del fuego para luz y calor, y la energía de su cuerpo, con el arco y el garrote, para sobrevivir y comer. En los siglos siguientes, su búsqueda del bienestar material ha estado muy vinculado al aprovechamiento de diversas formas de energía, como son carbón, petróleo y más complejos y eficaces para usar la energía en metas más y más difíciles. La conquista de la Luna se ha hecho posible por haber dominado a la energía química en los cohetes del cabo Kennedy, la exploración de los planetas dependerá de dominar la energía contenida en el núcleo del átomo.

Pero, ¿qué es, exactamente, la energía? No es nada perceptible por los sentidos. Se puede presentar en muchas formas, como energía del movimiento o energía cinética. Se presenta también como luz y calor, también se encuentra en forma atómica o molecular como energía química, o como el flujir de una corriente eléctrica.

Aunque en la actualidad se dice que en el futuro sólo nos quedará utilizar como recurso para obtener energía las plantas termoeléctricas con reactores nucleares, en la actualidad en nuestro país existe todavía potencial para construir presas para generación de energía eléctrica que además pueden tener instalaciones para otro tipo de aprovechamientos hidráulicos. Además las presas son una fuente de generación limpia y su mantenimiento es mínimo.

DESCRIPCIÓN: Una central hidroeléctrica es el conjunto de obras civiles y equipos electromecánicos. Esta diseñada con el objeto de transformar la energía potencial del agua en energía eléctrica, en el momento que sea demandada por el Sistema Eléctrico Nacional Intercomunicado.

El agua que se aprovecha en este proceso proviene de los ríos, a los que se interrumpe su curso, para almacenar un gran volumen mediante una obra de contención levantada perpendicularmente al cauce del río. De esta forma se impide el flujo natural y se le obliga a embalsarse o represarse, conservando su nivel con poca variación apreciable; creando con esto un vaso de almacenamiento que cuente con las reservas a poder generar una potencia constante a lo largo de un período determinado de tiempo.

Normalmente las presas cuentan con vertederos, cuya función sustantiva es la de prevención. Las aguas excedentes que se aprovechan para la generación, son derramadas al cauce del río aguas abajo de la presa para evitar riesgos a las instalaciones.

El proceso de generación de energía hidroeléctrica se inicia en la obra de toma, lugar en donde se encuentran instaladas las rejillas que evitan el paso de materiales y objetos que podrían ocasionar daños a las turbinas. Después aparecen las compuertas que son los equipos que se utilizan como órganos de control del agua y de seguridad, (para cerrarse en caso de emergencia).

Al abrir las compuertas de la obra de toma, se permite el llenado del túnel de conducción y de la tubería de presión entre la bocatoma y la turbina, quedando todo preparado para iniciar el arranque de la Unidad, cuando esto sea requerido.

Al dar orden de arranque, la energía cinética (de velocidad) del agua impulsa el rodete de la turbina hasta llevarle a la velocidad nominal (r.p.m.), directamente acoplando mediante una flecha, el rodete de la turbina transmite un par mecánico al rotor del generador eléctrico a fin de efectuar la conversión de energía mecánica en eléctrica.

Del proceso anterior, podemos resaltar lo siguiente:

La energía potencial existente entre el nivel del embalse y la salida del agua de las turbinas, sufre una serie de transformaciones a través de las obras de conducción y las máquinas de generación de energía eléctrica. La primera de ellas se produce cuando la energía potencial se transforma en energía cinética o de movimiento, esto al pasar el agua por las tuberías hasta llegar a la turbina.

La segunda, cuando se produce el paso de energía cinética a mecánica. Sucede cuando el agua llega a los alabes del rodete y genera el movimiento de este último.

Y el tercer cambio de energía es el de mecánica a eléctrica, produciéndose en los alternadores mediante la acción del campo giratorio sobre el estator. Aquí se produce la energía eléctrica la cual es administrada y distribuida en todo el país.

CONTENIDO DE LOS CAPÍTULOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO I.

En el capítulo I se describen primero los estudios geológicos que se deben realizar para la elección del tipo de cortina y de los materiales a utilizar con sus respectivas resistencias. Es importante conocer la resistencia del terreno, la facilidad con la que se puede adaptar para soportar un determinado tipo de cortina u otra obra y su permeabilidad o la facilidad de hacerlo impermeable o tapar fugas, etc. Dentro de éste apartado se incluye una descripción del origen de los sismos y su importancia en la elección del tipo de cortina, también se incluye una descripción del desplazamiento de placas y los plegamientos que se originan y la influencia que aporta esto en la cortina y los daños que podría provocarle según su tipo.

En el segundo apartado se mencionan algunos métodos para obtener la topografía de un terreno y se describe brevemente el procedimiento que siguen algunos de ellos y cuándo es conveniente aplicarlos según que tan accidentado esté el terreno, la facilidad de llegar los detalles que se requerirán y el área que queremos abarcar. También se describe la manera de conocer el mejor punto para levantar un obstáculo a un río para provocar un remanso (luego hay que verificar si el terreno lo soporta) que nos cree un volumen máximo de agua para almacenar y controlar avenidas.

Finalizando este capítulo se describen algunos métodos para localizar el parteaguas y conocer la cantidad de agua de lluvia que va a llegar a la presa, para esto requerimos estudios de infiltración de agua en el terreno y la evapotranspiración del lugar, así podemos conocer la cantidad de agua que podemos aprovechar y así elegir la potencia instalada que tendrá la presa, la altura que debemos dar a la cortina y así elegir el número y tipo de unidades para generación de energía. Por otro lado también debemos conocer a través del tiempo la variación de gastos en los ríos para proteger a la presa, así estos datos nos sirven para diseñar las ataguas, la obra de desvío, la obra de excedencias y la capacidad de control de avenidas de la presa.

CONTENIDO DEL CAPÍTULO II:

Este es el capítulo fuerte de la tesis, se enfoca a la descripción detallada de cada una de las obras que conforman a una presa, la manera en que se elige el tipo de obra y el material a utilizar, también se describe su función y su importancia. Primeramente, en el cuarto apartado se describe el vaso de almacenamiento, con los niveles que definen la capacidad de azolves, la capacidad de regulación de avenidas, la capacidad útil y la capacidad muerta. En este mismo apartado se habla del obstáculo que provoca el remanso del río para la creación del embalse, es decir, de la cortina, de los factores que determinan el tipo de cortina a usar, el desplante de la cortina, el tipo de cortina utilizar, describiendo todos los tipos de cortinas que hay y en consecuencia el tipo de material a utilizar, también se describe brevemente un método de cálculo para conocer el volumen de material a utilizar. También se describen algunos métodos para calcular las dimensiones y refuerzo de la cortina.

En el quinto apartado se describe el diseño de las ataguías, con los diferentes tipos de ataguías que existen, La diferencia que existe tanto en diseño como en importancia entre la ataguía aguas arriba y la ataguía aguas abajo, los periodos de retorno recomendados para definir la altura de las ataguías según la importancia de la obra y algunos de los métodos de cierre de cauces, el frontal y el lateral y cuándo conviene usarlos. Finalmente en éste apartado describimos la primer obra que se construye en un proyecto, que es la obra de desvío, algunos de los tipos de obras de desvío, la conveniencia de usarlos en determinadas circunstancias, algunos métodos de cálculo y un procedimiento constructivo de algunos tipos de obras de desvío.

En el sexto apartado se describe la función del vertedor, la importancia de la existencia de un vertedor en una presa, los diferentes tipos de vertedores que hay y algunos métodos de cálculo para los más comunes tipos de vertedores, el procedimiento constructivo utilizado en algunas obras de excedencias.

En el séptimo apartado se habla del diseño de la obra de toma, las protecciones que ésta debe llevar y el orden en que deben estar y el lugar más adecuado para su colocación, también se habla del diseño de las rejillas de entrada. Después se habla del túnel de conducción, principalmente de la elección del diámetro. Ligado al túnel de conducción está el pozo de oscilación, el cual nos

sirve para aliviar las sobrepresiones tanto en el túnel de conducción como en la tubería a presión, el túnel de conducción normalmente también conduce el agua a presión, aunque puede ser un canal, por eso algunas veces tenemos en obra dos pozos de oscilación, y en éste apartado se trata con más detalle cuándo es conveniente tener dos pozos de oscilación y las características que diferencian al túnel de conducción de la tubería a presión. Finalmente se trata de la casa de máquinas, tanto de las dimensiones que debe tener, el número y tipo de turbinas que nos conviene instalar según la carga y el gasto, de las características que deben de tener los materiales de ésta obra y también del desfogue de las turbinas.

CONTENIDO DEL CAPÍTULO III:

En este capítulo se mencionan algunas de las presas que sirven de ejemplo para mostrar los diferentes tipos de obras que conforman a una presa, incluyéndose los principales datos de cada una como son: El tipo de cortina con su altura, el material utilizado y el volumen de dicho material, el tipo y capacidad de la obra de excedencias, el tipo de obra de desvío utilizada con su capacidad, la localización, tipo y capacidad de las obra de toma y conducción incluyendo la tubería a presión, el número y tipo de turbinas utilizadas, la potencia instalada, el tipo de ataguías utilizadas, etc. Se incluyen pequeños diagramas de localización y planos esquemáticos así como fotografías de algunas de las obras.

CONTENIDO DEL CAPITULO IV:

Este capítulo incluye las conclusiones que salen a lo largo de todos los capítulos y apartados anteriores, así como también comentarios y propuestas para el mejor aprovechamiento de éstas presas con otros fines durante y después de su vida útil.

CAPÍTULO I
ESTUDIOS PREVIOS

I. ESTUDIOS PREVIOS.

I. 1 ESTUDIOS GEOLÓGICOS:

I. 1. 1 GEOLOGÍA GENERAL: La geología es la ciencia que estudia la tierra; es un conjunto de conocimientos acerca del globo terrestre en el que vivimos; acerca de sus montañas, planicies y profundidades oceánicas. Según los alcances de ésta tesis, la parte que nos interesa de la geología es la correspondiente a montañas y planicies que tengan las características para almacenar agua suficiente para generar un aprovechamiento hidráulico.

ROCAS ÍGNEAS: Formadas por la solidificación de materia fundida, las rocas ígneas incluyeron la primera corteza de la tierra; ésta ha sufrido transformaciones desde entonces, pero todas las rocas se han derivado del material de las primeras rocas ígneas.

Dentro de la corteza de la Tierra se han generado receptáculos de roca fundida que busca salida hacia la superficie para escurrir o salir violentamente por conductos o fisuras y solidificarse como roca, también puede permanecer dentro de la corteza donde se enfría lentamente y se solidifica.

MASAS DE ROCAS ÍGNEAS: De los estudios necesarios para la ubicación de las obras, nuestro interés es por las masas de rocas y productos piroclásticos y algunas de las formas terrestres resultantes: mesetas de basalto y volcanes, que no son sino masas superficiales de rocas ígneas.

Cuando el magma pierde su movilidad dentro de la corteza y cesa su actividad se solidifica "in situ", formando masas de roca ígnea de diversas formas y tamaños. La primera parte interna de un volcán expuesta por la erosión es el tapón que se forma cuando el magma se solidifica en el conducto. A continuación aparecerán los canales a través de los cuales el magma se movió hacia la superficie. Finalmente en algunas regiones de actividad remota la corteza ha sido elevada y erosionada a tal grado que el enorme depósito que alguna vez aportó todo el magma se puede ver en la superficie como una masa sólida de roca.

A medida que el levantamiento y la erosión descubren la construcción interna de un volcán extinto se pueden apreciar otras masas de roca ígnea. En estas masas quedan incluidos ramales solidificados del magma del receptáculo introducidos en otras rocas de la corteza, sin que necesariamente tengan conexión con la erupción de un volcán.

INTEMPERISMO Y SUELOS: La inscripción borrosa de una piedra sepulcral, los cimientos de un antiguo edificio que se desmoronan, las rocas situadas a lo largo de las cunetas de un camino, todo ello nos dice que las rocas están sujetas a una destrucción constante. Los cambios bruscos de temperatura, la humedad que empaña el suelo, la incansante actividad de los seres vivos, todo tiende a destruir las rocas. Este proceso de destrucción es lo que se llama intemperismo y se le define como los cambios que tienen lugar en los minerales y rocas o cerca de la superficie de la Tierra por efectos de la atmósfera, del agua, de las plantas y de la vida animal. Este proceso desempeña un papel vital en el ciclo de las rocas, pues mediante el ataque del material superficial de la corteza terrestre, produce las materias primas para la formación de nuevas rocas. Los productos del intemperismo son por lo común acarreados por el agua y por la influencia de la gravedad y menor parte por el viento y el hielo glaciar. A continuación caen para acumularse y asentarse en otros nuevos lugares. El lodo de un río creciendo por ejemplo, es en realidad material intemperizado que está siendo transportado del terreno a algún lugar de la cuenca de asentamiento, por lo común el océano. Sin embargo, algunas veces los productos del intemperismo permanecen en el mismo sitio donde se formaron y se incorporan a las rocas del lugar. Ciertas menas, como las del aluminio por ejemplo, son en realidad antiguas zonas de intemperismo.

TIPOS DE INTEMPERISMO: Existen dos tipos generales de intemperismo: el mecánico y el químico. En la naturaleza es difícil separar estos dos tipos porque a menudo van juntos, aunque en determinados ambientes predomina uno u otro.

INTEMPERISMO MECÁNICO. El intemperismo mecánico que también es mencionado como desintegración, es un proceso por el que las rocas se rompen en fragmentos más y más pequeños, como resultado de la energía desarrollada por las fuerzas físicas. Por ejemplo, cuando el agua se congela en una roca fragmentada la presión debida a la expansión del agua congelada puede desarrollar suficiente energía para astillar fragmentos de la roca. O bien, un peñasco que por la fuerza de gravedad desciende sobre una pendiente pedregosa, se puede despedazar en fragmentos más pequeños.

Los cambios de temperatura, si son suficientemente rápidos y elevados pueden provocar el intemperismo mecánico de la roca. En las áreas donde la roca desnuda está expuesta en la superficie y carece de la protección de un manto de suelo, los incendios del bosque o de la maleza pueden generar calor suficiente para romperla. El calentamiento rápido y violento de la zona exterior de la roca provoca su expansión y si ésta es bastante grande se desprenden hojuelas o fragmentos más grandes de la roca. Los rayos inician tales incendios con frecuencia y en casos relativamente raros pueden llegar a hacer pedazos las rocas de la superficie de un golpe directo. Subsiste aún la duda en cuanto a si las variaciones de temperatura del día a la noche, o del invierno al verano, pueden causar intemperismo mecánico. En teoría causan desintegración tales cambios de temperatura. Por ejemplo, sabemos que los diferentes minerales que forman un granito se expanden y se contraen a diferentes velocidades a medida que reaccionan a temperaturas crecientes o

decrecientes. Es de suponerse que hasta la expansión y contracción mínimas de los minerales adyacentes por periodos largos de tiempo pueden debilitar las uniones entre los granos minerales y que entonces sería posible que la desintegración ocurriese a lo largo de estos límites.

ACCIÓN DE LAS HELADAS: El hielo es mucho más efectivo que el calor para producir intemperismo mecánico. Cuando el agua que escurre por las fracturas, grietas y poros de una masa de roca se congela, su volumen aumenta aproximadamente un 9 por ciento. Esta expansión del agua a medida que pasa del estado líquido al estado sólido, desarrolla presiones dirigidas hacia fuera de las paredes interiores de la roca. Tales presiones son lo suficientemente grandes como para desprender fragmentos de la superficie de la roca. Cuando la temperatura ha descendido unos 22 grados centígrados, la presión ejercida puede ser hasta de 2,100 kilogramos por centímetro cuadrado, equivalente a la que produciría un bloque de granito de 2.1 toneladas sobre una base de un centímetro cuadrado de presión. Esta temperatura no es excesivamente baja y se obtiene varias veces al año en latitudes medias.

Sin embargo bajo condiciones reales, probablemente estas presiones tan elevadas nunca se producen por la acción del hielo, al menos cerca de la superficie. Para desarrollar una presión interna de 2,100 kilogramos sobre centímetro cuadrado, la grieta de la roca tendría que estar completamente llena de agua y totalmente sellada, y la roca encajonante tendría que ser lo suficientemente fuerte para resistir presiones, cuando menos, por encima de éste valor. Pero la mayoría de las cavidades contienen algún aire, además del agua y están abiertas, bien hacia la superficie o en dirección de otras cavidades. A mayor abundamiento, ninguna roca puede resistir una presión de 2,100 kilogramos sobre centímetro cuadrado, si la presión está dirigida de adentro hacia fuera.

A pesar de todo la acción del hielo origina una gran parte del intemperismo mecánico. El agua llena las cavidades y los poros de una roca, por lo común empieza a congelarse en la parte superior, por el contacto del aire frío. El resultado es que con el tiempo, el agua de la parte inferior está confinada por un tapón de hielo. Entonces a medida que avanza la congelación, el agua confinada se expande, ejerciendo presión hacia fuera. La roca puede quedar sujeta a esta acción varias veces al año. En las altas montañas, por ejemplo, la temperatura puede subir y bajar, cruzando la línea de la congelación casi diariamente.

Un segundo tipo de intemperismo mecánico, producido por el agua que se congela, es el que se llama palpitación (frost heaving). Esta acción suele producirse en los depósitos de grano fino inconsolidados, antes que en la roca sólida. Gran parte del agua que cae como lluvia o nieve se embebe en el suelo donde se congela durante meses invernales. Si las condiciones son propicias, se acumula más y más hielo en las zonas de congelación a medida que aumenta la cantidad de agua procedente de la atmósfera y avanza del suelo no congelado hacia abajo, en forma

parecida a la de un secante que chupa la humedad. Con el tiempo se forman masas de hielo lenticulares, y el suelo que está sobre de ellas "palpita" o se mueve hacia arriba. Esto se observa en los caminos de construcción pobre, también los prados y jardines están suaves y esponjosos en la primavera, como consecuencia de la palpitation del suelo durante el invierno.

EXFOLIACIÓN: La exfoliación es un proceso de intemperismo mecánico en virtud y por la acción de fuerzas físicas internas, se separan de una roca grande placas curvas a manera de costras. Este proceso origina dos rasgos bastante comunes en el paisaje: unas colinas grandes abovedadas, llamadas "domos de exfoliación", y peñascos redondeados llamados comúnmente peñascos o cantos intemperizados esféricamente. Es posible que las fuerzas que producen estas dos formas se originen de maneras diferentes, pero esta explicación escapa a los propósitos de éste trabajo.

ROCAS SEDIMENTARIAS: Existe arena de playa, gravas de un arroyo y fango de pantano, ninguno de éstos materiales sugiere una roca sólida y dura. No obstante, esta clase de depósitos o los materiales similares a ellos constituyen la materia prima a partir de la cual se han formado las grandes moles de roca expuestas en la superficie de la Tierra. Cuando desde arriba contemplamos el Gran Cañón del Colorado, se pueden observar capas de roca sólida que fueron una vez depósitos inconsolidados de arena, grava y lodo. Con el transcurso del tiempo estos sedimentos sueltos se han endurecido, convirtiéndose en lo que llamamos rocas sedimentarias.

La historia de las rocas sedimentarias comienza con los procesos de intemperismo, ya que los productos del intemperismo químico y mecánico constituyen la materia prima de las rocas sedimentarias. Los ríos, los glaciares, el viento y las corrientes oceánicas desplazan los materiales intemperizados hacia nuevas localidades y los depositan como arena, grava o fango. La transformación de estos sedimentos en roca viene a ser la etapa final en el desarrollo de las rocas sedimentarias.

Algunos sedimentos particularmente la arena y la grava, se consolidan y convierten en roca mediante un proceso que cementa a los granos individuales. El agua del subsuelo que escurre a través de los espacios abiertos deja tras ella un depósito mineral que sirve para cementar firmemente los granos, dando a todo el depósito la resistencia que asociamos con la roca. Otros sedimentos, como los depósitos finos de lodo se transforman en roca por el peso de los depósitos superyacentes que los comprimen y compactan en espacios de roca cada vez menores.

La roca sedimentaria que resulta de cualquiera de estos procesos puede quedar expuesta en la superficie terrestre. Si la roca se formó bajo el fondo del océano

puede quedar expuesta, por la lenta retirada de los mares o por el movimiento del fondo del mar hacia arriba, para formar nuevas áreas de tierra, continentales o islas.

Es extremadamente difícil establecer una definición completa y concisa de las rocas sedimentarias. El adjetivo *sedimentario* del latín *sedimentum* significa "asentamiento". Así podemos esperar que las rocas sedimentarias se formen cuando las partículas individuales contenidas en un fluido se asientan, como en el agua de un océano o de un lago. Muchas rocas sedimentarias fueron formadas precisamente de ésta manera. Los fragmentos o los minerales derivados de la ruptura de las rocas son arrastrados hacia cuerpos de agua donde se asientan como sedimentos inconsolidados, para endurecerse más tarde convirtiéndose en verdaderas rocas sedimentarias. Pero otras tales como la sal de roca, están formadas por minerales que quedan por la evaporación de grandes masas de agua. Y estas rocas son tan sedimentarias como las formadas por las partículas que se asientan en el fondo del océano. Aún más existen rocas sedimentarias, compuestas en gran parte por las conchas y partes duras de los animales, particularmente de invertebrados marinos.

Las rocas sedimentarias se hallan frecuentemente dispuestas en capas o estratificadas. A diferencia de las rocas ígneas macizas, tales como el granito, la mayoría de las rocas sedimentarias se depositan en una serie de capas individuales superpuestas. La superficie de cada capa es esencialmente paralela al horizonte al tiempo de depósito y una sección transversal deja al descubierto una serie de capas como en un pastel gigantesco. Es cierto que algunas rocas ígneas, tales como las formadas por derrames de lava, también están estratificadas, sin embargo, la estratificación es rango más característico de las rocas sedimentarias.

Aproximadamente el 75 por ciento de las rocas expuestas en la superficie de la tierra son sedimentarias, o rocas metamórficas derivadas de aquéllas. Sin embargo las rocas sedimentarias representan sólo alrededor del 5 por ciento en volumen de los 15 kilómetros exteriores del globo. El otro 95 por ciento de las rocas en esta zona de 15 kilómetros, son o fueron alguna vez rocas ígneas. La cubierta sedimentaria resulta apenas tan gruesa como la orilla de una pluma donde recubre las rocas ígneas de las Adirondakes y de las Rocallosas. En otros lugares tiene miles de metros de espesor. En la región de la delta del río Mississippi las perforaciones petroleras han cortado más de 6,700 metros de corteza sin haber encontrado más que rocas sedimentarias. En la cuenca del río Ganges, en la India, se ha estimado el espesor de los depósitos sedimentarios entre 13,700 y 18,000 metros.

Existe un tercer tipo de rocas en la Tierra, las rocas metamórficas, pero son rocas que no se encuentran en problemas de cimentación de una presa, por lo que no son motivo de estudio para este trabajo.

DEFORMACIÓN DE LA CORTEZA TERRESTRE: La corteza de la Tierra está cambiando constantemente. Hemos tratado los efectos de la erosión y de la

actividad ígnea, pero el terreno removido por la erosión ha sido reemplazado en mayor escala por la deformación que por el depósito durante las etapas de erupción a través de volcanes o fisuras.

EVIDENCIAS DE LA DEFORMACIÓN DE LA CORTEZA: La evidencia de la incesante deformación está presente en todas las rocas de la corteza terrestre, sin importar su antigüedad; algunas se han inclinado o han sufrido ruptura; otras se han hundido o elevado cientos y aun miles de metros.

Además de esta corteza de movimientos pasados, registrados en las rocas mismas, otras líneas de evidencia apuntan a la misma conclusión: la corteza terrestre está siendo deformada. Por ejemplo durante la época de ciertos terremotos históricos han ocurrido movimientos abruptos, y a través de mediciones sucesivas y otros procedimientos se han podido medir movimientos lentos. La costa de California se está moviendo hacia el noroeste a razón de unos cinco centímetros por año. Hay un lugar en el que este lento desplazamiento ha podido advertirse sin levantamientos topográficos: en Tres Pinos, California, una fábrica de vinos construyó uno de sus edificios abarcando las dos porciones de tierra que se están moviendo una con relación a la otra, como consecuencia de lo cual el edificio se ha ido torciendo paulatinamente. En Japón, los levantamientos han indicado que la corteza terrestre está formada por un verdadero mosaico de bloques de unos 15 kilómetros de largo que se están removiendo e inclinando de una u otra manera, como tortas de hielo en un mar tormentoso. La cantidad de movimiento es minúscula; pero existe, e involucra todo el espesor de la corteza.

Para poder hacer un proyecto para la construcción de un proyecto hidroeléctrico es necesario conocer todas las características de la zona que abarque el proyecto, hemos visto que existen diferentes tipos de suelos, con la combinación de datos se deben analizar diferentes alternativas para levantar la cortina, y en función del lugar propuesto para cada alternativa se elegirá el tipo de cortina. Por ejemplo: si tenemos un estrecho cañón, nos conviene una cortina del tipo arco - bóveda (Caso del Proyecto Hidroeléctrico "Zimapán") pero primero se debe conocer el desplazamiento que existe en el terreno, pues el cañón podría estar cerrando o abriendo, en el primer caso este movimiento podría transmitir a los materiales esfuerzos adicionales a los considerados provocando así una falla que podría ser de proporciones catastróficas o crear grietas indeseables que finalmente interrumpen el buen funcionamiento del elemento, en el segundo caso la cortina se desprendería de su cimiento, para evitar estos problemas convendría como mejor opción una cortina de tierra y enrocamiento que es capaz de tener un reacomodo de partículas que puede adaptarse a las deformaciones del terreno (Caso del Proyecto Hidroeléctrico "Chicosás"). La regla es la misma para cañones no estrechos se puede hacer una cortina de concreto que trabaje a gravedad (Caso de Proyecto Hidroeléctrico "Huites", ahora "Luis Donáldo Colosio") o una cortina de tierra y enrocamiento (Caso del Proyecto Hidroeléctrico "Agua Milpa").

Otro factor importante es el tipo de suelo donde se desplantará la cortina, para cimentar en roca, seguramente se necesitará un tratamiento primeramente de desmonte y despalme para dejar la roca sana descubierta, seguido de una preparación del terreno que le de una forma que pueda brindar un apoyo a la cortina y finalmente un relleno de las grietas y fisuras que existan en el macizo rocoso. Si el suelo es un depósito de algún material fino, se debe analizar el flujo de agua que habrá bajo la cortina para diseñar elementos adecuados al tipo de suelo, por ejemplo, existirá flujo de agua bajo la cortina, si no se prevé éste problema podrían crearse problemas de tubificación, que es un problema muy común, ésta tubificación puede erosionar el terreno disminuyendo su capacidad de carga y provocando una falla de cimentación, una solución a éste problema es poner tablaestacas impermeables que obliguen a que el recorrido del agua aumente y en consecuencia aumente la pérdida de energía del agua, disminuyendo así la erosión en el terreno a un nivel aceptable.

En cuanto al lugar de desplante de la cortina, se debe tener en cuenta el tipo de suelo, si es roca sana se deben hacer sondeos para conocer el nivel de agrietamiento del macizo rocoso para afectar la resistencia de la roca con un factor de seguridad acorde a los estudios, para tener datos confiables. Por otro lado en caso de existir grietas, se deben rellenar a fin de que sellen e impidan el paso de agua a través de ellas.

1. 1. 2 TECTÓNICA: Los sismos de gran magnitud se explican por una teoría llamada *tectónica de placas*. La litosfera, de un espesor de alrededor de 80 kilómetros está subdividida en un buen número de grandes placas. En zonas donde el espesor de la litosfera es menor, en general en el fondo de los océanos, a través de las discontinuidades de estas placas, fluye hacia arriba el magma que se encuentra a presión y en estado líquido debajo de la litosfera. La emersión de éste magma produce empujes sobre las placas adyacentes a la falla; estos empujes se reflejan en los extremos opuestos de las placas donde se generan grandes presiones en las zonas de contacto. Según las características de las placas que entran en contacto se presentan distintos fenómenos. Donde entra en contacto una placa oceánica con una continental, la primera de menor espesor y mayor densidad se hunde abajo de la segunda, ocasionando la desaparición de parte de la litosfera que se vuelve nuevamente magma. Cuando entran en contacto dos placas continentales que se mueven en sentidos opuestos, suele producir una elevación, o sea, ambas placas se doblan hacia arriba dando lugar a la formación de grandes cadenas montañosas (como las del Hima'aya). Cuando la dirección del movimiento de dos placas continentales es similar, se produce un deslizamiento de una sobre la otra, sin que haya creación o destrucción de litosfera. La falla de San Andrés en California es de éste último tipo. El fenómeno mencionado produce la llamada *deriva de los continentes*, o sea el movimiento de las placas, que hace que regiones enteras de la superficie terrestre se trasladen y cambien de posición entre sí. Para dar una idea aproximada de la magnitud del fenómeno, basta decir que los movimientos son del orden de una decena de centímetros al año, y han provocado que a lo largo de millones de años, América del Sur pasara de estar al lado de la costa occidental de África a ocupar la posición actual.

El corrimiento en la zona de contacto entre dos placas no ocurre de manera continua y suave; la fricción entre las rocas hace que se puedan generar en la superficie de contacto entre las placas esfuerzos considerables, hasta que se vence la resistencia mecánica en dicha superficie provocando un deslizamiento brusco y la liberación súbita de una gran cantidad de energía. Este deslizamiento ocurre en cierta longitud a lo largo de la falla. Mientras mayor es la longitud afectada por el movimiento, mayor será la cantidad de energía liberada. La energía liberada produce ondas en la corteza terrestre, las que se transmiten a grandes distancias y provocan la vibración de la superficie del suelo (ver figura 1. 1).

La correlación entre la localización de las fallas geológicas que constituyen zonas de contacto entre placas y los puntos donde se originan los sismos, se aprecia claramente en la actualidad, se sabe que los epicentros se concentran en placas bien definidas, la principal de las cuales constituye el llamado Cinturón Circunpacifico; otra es el Cinturón Alpino. Todas estas zonas corresponden a límites entre placas. Aunque ocurren en esas zonas, algunos llegan a producirse en fracturas que existen dentro de las placas.

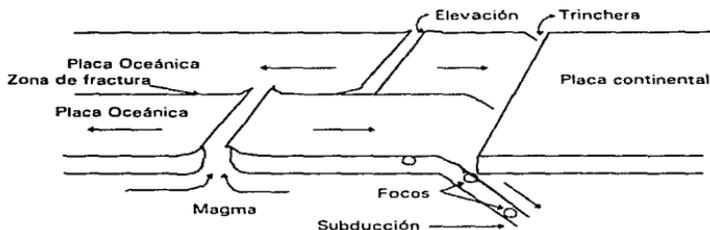


FIGURA 1. MOVIMIENTO DE PLACAS Y GENERACIÓN DE SISMOS

En México, la mayoría de los sismos de gran magnitud ocurren por la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa de Norteamérica. La línea donde comienza la subducción se encuentra a pocos kilómetros de las costas de Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Michoacán. Los deslizamientos entre las placas que generan los sismos no ocurren a intervalos definidos y constantes según las características de la superficie de contacto en una zona particular, puede ocurrir un corrimiento en breve tiempo después de un sismo previo o, por el contrario, en esa zona pueden acumularse grandes cantidades de energía y pueden pasar varias décadas antes de que se produzca un nuevo corrimiento. En general, en el primer caso se tratará de un sismo de poca magnitud y en el segundo de uno muy severo. Estas consideraciones han llevado a sismólogos a tratar de analizar la sucesión temporal de la ocurrencia de sismos en diversas zonas de subducción, para identificar las llamadas brechas sísmicas, o sea aquellas zonas que son llamadas sísmicamente activas y que han tenido un largo periodo de quietud y en las que, por lo tanto, se espera que ocurra en un futuro próximo un sismo de magnitud apreciable.

La brusca caída de esfuerzos que acompaña al deslizamiento de las placas que genera ondas sísmicas debidas a las deformaciones longitudinales (de compresión) o transversales (de cortante) de la roca. Estas ondas viajan alejándose de la falla y su amplitud se va atenuando poco a poco. Las ondas longitudinales (llamadas ondas P o principales) viajan a mayor velocidad y tienen frecuencias más altas y amplitudes menores que las ondas de cortante (ondas S o secundarias). A medida que se alejan de la falla, las ondas mencionadas se relajan en las capas superficiales y producen otro tipo de ondas (de superficie) que tienen velocidades menores que las anteriores. De esta manera, cerca de la falla, los tres tipos de ondas están superpuestos, pero a distancias grandes de la falla se distinguen los tres trenes de ondas porque llegan en tiempos diferentes.

La velocidad y la distancia a las que se pueden transmitir las ondas sísmicas dependen de las propiedades mecánicas del medio que atraviesan y puede haber amplificaciones locales de determinadas frecuencias cuando atraviesan estratos de suelo con ciertas propiedades mecánicas. La amplitud y el contenido de frecuencias de ondas en un sitio dado dependen, principalmente, de la magnitud del sismo y de las propiedades del suelo local.

Conviene aclarar aquí algunos términos de uso común en sismología y que se emplean con frecuencia de manera inapropiada.

La *magnitud* de un sismo es una medida del tamaño del mismo y es independiente del lugar donde se hace la observación y que se relaciona en forma aproximada con la cantidad de energía liberada durante el evento. Se determina a partir de las amplitudes de registros de sismógrafos estándar. La escala más conocida de magnitudes es la de Richter. Cada incremento de una unidad en la escala de Richter implica un aumento de 32 veces en la energía liberada. Existen otras escalas de magnitud que se basan en ondas de cuerpo (mb) en ondas de superficie (ms) y en el momento sísmico (mw). Hay diferencias significativas en las magnitudes por las diferentes escalas.

La intensidad de un sismo es una medida de los efectos que éste produce en un sitio dado, o sea de las características del movimiento del terreno y de la potencialidad destructiva del sismo, en ese lugar en particular y en lo que concierne a sus efectos en las construcciones. Se han propuesto diversas escalas para medir la intensidad; algunas muy precisas pero se basan en mediciones instrumentales difíciles de obtener para los sitios que interesan. La más común es la de Mercalli modificada, en la que la intensidad se mide por una apreciación subjetiva del comportamiento de las construcciones en el sitio. Las intensidades varían en grados que se designan con los números romanos I a XII. Debido a que la intensidad se asigna con base en la gravedad del daño sufrido por las construcciones, ésta resulta poco confiable, ya que el grado asignado depende de la calidad de las construcciones del lugar.

Es frecuente la confusión entre la magnitud e intensidad. Debe recordarse que la magnitud es una medida de la potencia del sismo en sí, independiente del lugar donde se mide. La intensidad es una medida de las características del movimiento del terreno que el sismo provoca en un sitio dado. Desde el punto de vista de ingeniería sísmica, lo que interesa son las intensidades que pueden presentarse en el lugar donde se va a construir la presa. Una misma intensidad puede ser producida por un sismo lejano de gran magnitud o por uno cercano de mucha menor magnitud. Por ejemplo el sismo que destruyó Managua en 1972 fue de magnitud relativamente

baja (5.7 grados en la escala de Richter); su foco epicentro se localizó , sin embargo, en el mismo centro de la ciudad, así que la intensidad del movimiento del terreno fue muy alta en Managua (del orden de IX en la escala de Mercalli) y la destrucción que provocó fue extraordinaria.

El foco de un sismo es el lugar donde comienza el corrimiento de la falla geológica que originó el sismo; *epicentro* es el punto sobre la superficie terrestre directamente encima del foco. El foco y el epicentro se determinan a partir de mediciones instrumentales en diversos sitios; su localización resulta frecuentemente poco precisa debido a la falta de un número suficiente de instrumentos y al desconocimiento de la estructura terrestre.

La *sismicidad* de una zona se relaciona con la actividad sísmica de la región o, más propiamente, con la frecuencia con que se generan los sismos de diferentes magnitudes en el área considerada.

El *riesgo sísmico* de un sitio se relaciona con la intensidad de los movimientos sísmicos que se esperan en el lugar y con la frecuencia con que se exceden movimientos de distintas intensidades. El riesgo sísmico de un lugar dependerá de la sismicidad de las regiones que se encuentran a distancias tales que los sismos de ellas generados pueden producir efectos apreciables en el sitio. La acción sísmica de diseño para una estructura dada dependerá, por tanto, del riesgo sísmico del lugar donde se va a construir.

Un *acelerograma* es un registro de la historia de aceleraciones que provoca el sismo en una dirección determinada y constituye la descripción más útil del movimiento del suelo en un lugar. Los acelerogramas se registran en aparatos llamados acelerógrafos, que colocados en sitio, arrancan automáticamente al ser excitados por el movimiento del terreno y registran simultáneamente la aceleración en dos direcciones horizontales ortogonales y en una vertical. El análisis de los acelerogramas permite una evaluación objetiva de la intensidad sísmica mucho más objetiva y confiable que por medio de la escala de Mercalli. Las características de los acelerogramas que más se relaciona con la potencialidad destructiva, o sea con la intensidad del sismo, son la aceleración, la duración de la etapa sensible, o sea de aquella en que la amplitud de aceleración tiene un valor apreciable y, finalmente las frecuencias dominantes del movimiento.

El movimiento del terreno puede considerarse constituido por la superposición de vibraciones armónicas con distintas frecuencias. Según las características del sismo, los movimientos cuya frecuencia se encuentra dentro de cierto intervalo tienen amplitudes mayores que los demás y son dominantes en cuanto a efectos sísmicos en las estructuras. Por ejemplo en sismos registrados muy cerca del epicentro prevalecen las vibraciones de alta frecuencia (periodos cortos), mientras que en un sismo registrado lejos del epicentro prevalecen movimientos de baja frecuencia (periodos largos).

Las aceleraciones que producen la mayoría de los daños en las estructuras son horizontales; las aceleraciones verticales son de amplitud apreciable sólo en sitios cercanos al epicentro y producen sollicitaciones severas sólo en algunas formas estructurales particulares. Existen además, efectos sísmicos excepcionales que no dependen de las aceleraciones; estos son debidos a inestabilidad del suelo en la que está desplantada la estructura. Por ejemplo, los fenómenos de licuación que ocurren cuando arenas poco densas saturadas, por efectos de la vibración producida por el sismo, pierden su fricción interna y se comportan prácticamente como un líquido, con lo cual la capacidad de carga se vuelve casi nula o nula, dando lugar a fuertes hundimientos e inclusive al volteamiento de las estructuras en ellas desplantadas. Otros ejemplos son los derrumbes o deslizamiento de las laderas que pueden arrastrar con ellos las construcciones, y los movimientos relativos de los bordes de una falla que pueden provocar rupturas en una estructura que la cruce. La forma de protegerse de estos fenómenos no es diseñar la estructura para que los absorba, sino reducir la probabilidad de que se presenten, con tratamientos previos de los suelos o evitando construir en zonas prácticamente críticas.

La aceleración no es el único parámetro del movimiento del suelo que influye en la respuesta de las estructuras, importan además la velocidad de movimiento del terreno y, en algunos casos, su desplazamiento. Integrado en el tiempo de acelerograma se obtiene la historia de velocidades o, integrando esta última, se obtiene la de desplazamientos del terreno. La integración se realiza mediante métodos numéricos estándar.

Los estudios del riesgo sísmico de lugares específicos se basa esencialmente en análisis estadístico de la información disponible sobre los sismos ocurridos. La cantidad y calidad de los datos disponibles es muy variable de uno a otro lugar. En general, se tiene información bastante confiable acerca de las magnitudes y epicentros de los sismos de mediana o gran magnitud ocurridos desde principios de siglo en cualquier parte del mundo.

La interpretación de los datos estadísticos se basa en la hipótesis de que el proceso de generación de los sismos es estacionario, o sea que la probabilidad de ocurrencia de un sismo en un sitio es constante en el tiempo. La explicación actualmente aceptada sobre el mecanismo de generación de sismos contradice esta hipótesis ya que, una vez liberada cierta cantidad de energía a través de un sismo, se necesita cierto lapso para que se vuelvan a generar esfuerzos elevados en el contacto entre las placas; sin embargo el análisis estadístico de los datos sísmicos disponibles muestra que, para intervalos de varias décadas, la hipótesis de un proceso estacionario da resultados aceptables. El modelo de probabilidades más generalmente empleado en los estudios de riesgo sísmico es el de Poisson.

RESPUESTA SÍSMICA DE LAS ESTRUCTURAS: Los métodos de análisis sísmico prescritos por los reglamentos de diseño y empleados en la práctica son generalmente muy simplificados y recurren a idealizaciones de la acción sísmica mediante sistemas de fuerzas estáticas equivalentes. Aun cuando se usen estos procedimientos, en vez de otros más refinados, no hay que perder de vista el carácter dinámico del fenómeno y es necesario conocer los principios básicos de la dinámica estructural. El tratamiento de este problema es materia de cursos específicos que escapan a los alcances de este trabajo, sólo nos limitaremos a una presentación somera de los conceptos esenciales de dinámica que permiten explicar los aspectos relevantes de la respuesta sísmica de las estructuras y principalmente de la que nos interesa (la cortina).

Una estructura responde a una excitación sísmica descrita por una historia de aceleración (o de velocidades o de desplazamientos) que se presentan en el suelo sobre el que está desplazada, mediante una vibración a través de la cual disipa la energía que es generada por dicho movimiento. La amplitud de la vibración necesaria para disipar esa energía depende de las características del sistema constituido por el conjunto subsuelo - cimentación - estructura - elementos no estructurales. A pesar de la complejidad de un sistema como éste, las principales características de su respuesta pueden ilustrarse mediante el estudio de un sistema simple de un grado de libertad.

El sistema simple está constituido por una masa, un resorte y un amortiguador. En el esquema mostrado en la figura (I. 1), el resorte se representa por medio de onda columna cuya rigidez lateral equivale a la constante del resorte. Cuando el sistema está sujeto a un movimiento de su base, definido por una historia de desplazamientos u_0 , o de aceleraciones del suelo \ddot{u}_0 , la masa entrará en oscilación y se generarán sobre ella tres tipos de fuerzas:

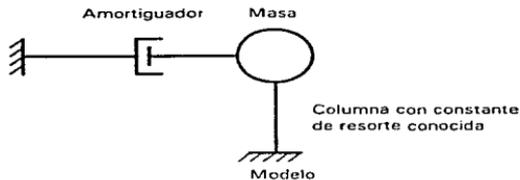


FIGURA I. 2. MODELO DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD

- a) La fuerza de inercia que de acuerdo con el principio de D'Alembert es proporcional a la masa y a la aceleración total que ésta sufre, \ddot{u}_i ; esta última es igual a la suma de la aceleración del terreno, \ddot{u}_o , más la relativa al terreno, \ddot{u} .

$$F_i = m\ddot{u}_T \quad \dots ec (I. 1)$$

- b) La fuerza se genera en la columna por su rigidez lateral al tratar de ser desplazada con respecto al terreno. Suponiendo que la respuesta de la columna se mantiene dentro de un intervalo lineal, dicha fuerza será igual al producto del desplazamiento relativo de la masa con respecto al suelo, por la rigidez lateral de la columna.

$$F_R = ku \quad \dots ec (I. 2)$$

c) La fuerza de amortiguamiento trata de restablecer el equilibrio de la estructura en vibración. Esta fuerza puede considerarse proporcional a la velocidad de la masa con relación al suelo; al factor de proporcionalidad se le llama coeficiente de amortiguamiento.

$$F_A = c\dot{u} \quad \dots \text{ec (l. 3)}$$

La ecuación de equilibrio dinámico se escribe como:

$$F_T + F_A + F_R = 0 \quad \dots \text{ec (l. 4)}$$

sustituyendo

$$m\ddot{u}_T + c\dot{u} + ku = 0 \quad \dots \text{ec (l. 5)}$$

γ ya que:

$$\ddot{u}_T = \ddot{u}_o + \ddot{u} \quad \dots \text{ec (l. 6)}$$

$$m\ddot{u}_T + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_o \quad \dots \text{ec (l. 7)}$$

o, dividiendo entre m,

$$\ddot{u} + c\dot{u}/m + ku/m = \ddot{u}_o \quad \dots \text{ec (l. 8)}$$

Las dos constantes, c/m y k/m , representan conceptos relacionados con la vibración libre del sistema (la que corresponde al caso $\ddot{u}_o = 0$). De ellas,

$$k/m = \omega^2 \quad \dots \text{ec (l. 9)}$$

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad \dots \text{ec (l. 10)}$$

en que ω es la frecuencia circular del sistema no amortiguado, o sea aquella con la que oscila éste cuando se le impone un desplazamiento y se le suelta. Cuando el amortiguamiento es nulo el sistema describe un movimiento armónico simple, con la frecuencia mencionada y con el periodo igual a:

$$T = 2\pi/\omega = 2\pi\sqrt{m/k} \quad \dots \text{ec (l. 11)}$$

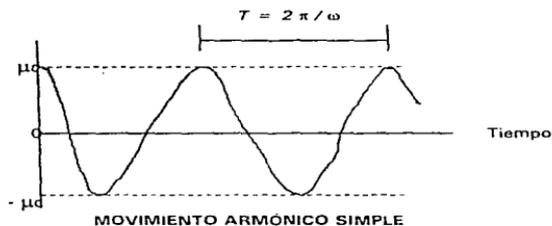


FIGURA 1. 2. MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE

El amortiguamiento representa la disipación de energía que la estructura realiza principalmente debido a la fricción interna de los materiales y a rozamiento entre los componentes de la construcción; este amortiguamiento reduce las oscilaciones. En vibración libre, se define como amortiguamiento crítico aquel para el cual el sistema, después de desplazado volvería a su posición de reposo sin oscilar. Este vale:

$$C_{cr} = \sqrt{km} \quad \dots \text{ec(l. 12)}$$

Por lo tanto, la constante de amortiguamiento puede expresarse como una fracción del crítico en la forma:

$$\xi = c/C_{cr} = c/2\sqrt{km} \quad \dots \text{ec(l. 13)}$$

pero

$$\sqrt{km} = m \sqrt{k/m} = m\omega \quad \dots \text{ec(l. 14)}$$

$$\xi = c/2m\omega \quad \dots \text{ec(l. 15)}$$

por otra parte:

$$c/m = 2\omega\xi \quad \dots \text{ec(l. 16)}$$

La ecuación diferencial se puede reescribir como:

$$\ddot{u} + 2\omega\xi\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{u}_o \quad \text{..ec(I. 17)}$$

Se aprecia que la respuesta del sistema queda definida por dos parámetros únicamente: la frecuencia circular del sistema (ω o su periodo) y la fracción del amortiguamiento crítico.

La solución de la ecuación diferencial, cuando la estructura parte del reposo, se obtiene como la superposición de la respuesta a una serie de impulsos diferenciales, en la forma llamada integral de Duhamel.

$$U(t) = -1/\omega \int_0^t \ddot{u}_o(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \text{sen}(\omega(t-\tau)) d\tau \quad \text{..ec(I. 18)}$$

La solución presentada en la forma de la ecuación (I. 18) implica la aproximación $1-\xi^2=1$, que es aceptable ya que para estructuras de ingeniería civil generalmente $\xi < 0.1$.

Obtener la respuesta del sistema mediante la solución de la integral de Duhamel representa un trabajo tedioso y que, debido a que la historia de las aceleraciones del terreno durante un sismo, $\ddot{u}_o(t)$, no puede expresarse mediante una fracción continua, requiere de procedimientos numéricos. Un caso que se presta a una solución relativamente sencilla y muy ilustrativa es aquel en que la excitación es un movimiento armónico tipo:

$$\ddot{u}_o = a \text{sen } \omega_o t \quad \text{..ec(I. 19)}$$

en que ω_o es la frecuencia circular de vibración de movimiento del terreno y 'a' una constante que define la amplitud de la aceleración del movimiento.

La solución se ilustra de manera adimensional en la figura (I.3), donde en las abscisas se representa la relación entre la frecuencia del movimiento del terreno y la del sistema y, en las ordenadas, la relación entre el desplazamiento máximo que se presenta en la masa bajo los efectos dinámicos y el desplazamiento estático que produciría una fuerza constante de magnitud "ma". Del examen de la figura, se

aprecia la importancia de los dos parámetros de la estructura que define su respuesta. Cuando la frecuencia del sistema es muy inferior a la de la excitación, el desplazamiento máximo de la masa, del que dependen las fuerzas que se inducen en el sistema, no excede al estático, pero a medida que las dos frecuencias se van aproximando entre sí (o sea cuando la relación tiende a uno), hay una amplificación cada vez mayor del movimiento del terreno y el desplazamiento en la masa llega a ser varias veces superior al del terreno y se inducen en el sistema fuerzas muy grandes. De hecho, cuando la relación de frecuencias es igual a uno, el desplazamiento llega a infinito si el amortiguamiento es nulo y se tiene el fenómeno llamado de resonancia. El amortiguamiento desempeña también un papel importante, especialmente en condiciones cercanas a la resonancia; basta un amortiguamiento relativamente pequeño para reducir drásticamente la respuesta.

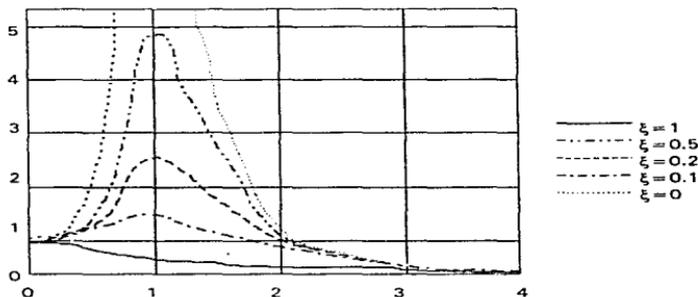


FIGURA 1. 3. AMPLIFICACION DINÁMICA DEL MOVIMIENTO DE UN SISTEMA LINEAL DE UN GRADO DE LIBERTAD SUJETO A VIBRACIÓN ARMÓNICA.

La respuesta de un sistema como el aquí estudiado, ante un movimiento irregular del terreno como el que ocurre en un sismo, se puede analizar a partir de la solución del caso del movimiento armónico. Un acelerograma de un sismo se puede considerar como la superposición de manera aleatoria de un gran número de ondas armónicas que cubren una gama de frecuencias muy amplia, pero que suelen tener amplitudes muy grandes sólo dentro de un intervalo de periodos dominantes que dependen del tipo de suelo. Ante esta serie de ondas de diferente periodo, el sistema responde con mayor amplitud a las que tienen periodo similar al suyo, mientras que para el resto la respuesta es pequeña.

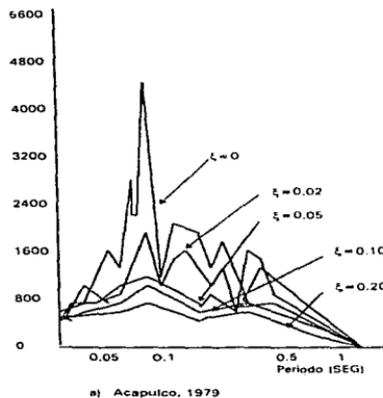
Desde el punto de vista del diseño estructural, interesa esencialmente la máxima sollicitación a la que se verá expuesta la estructura por efecto del sismo; por lo tanto no es necesario conocer la historia completa de la respuesta, sino sólo su valor máximo. Si para un acelerograma dado, obtenemos la respuesta de sistemas de un grado de libertad con un amortiguamiento dado y hacemos variar el período de estos sistemas desde cero hasta un valor muy alto comparado con los períodos naturales de las estructuras comunes, y para cada sistema determinamos la máxima respuesta podemos trazar las gráficas que se muestran en la siguiente página que constituyen espectros de respuesta de aceleración para los movimientos en cuestión. En las abscisas se representa el período del sistema y en las ordenadas una medida de su respuesta máxima, sea esta aceleración, velocidad o desplazamiento máximos de la masa. Los espectros de la figura son de aceleración, están contruidos para diferentes amortiguamientos y constituyen una representación de un sismo que es muy valiosa para apreciar sus efectos en la estructura y que por tanto puede emplearse como un índice de la acción sísmica.

El espectro de aceleraciones proporciona una medida directa de la fuerza de inercia máxima que se induce en el sistema al multiplicar la ordenada espectral por la masa.

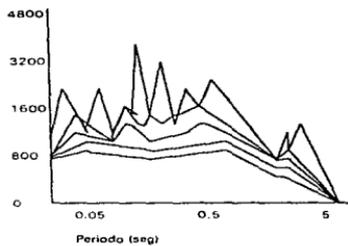
$$F = mSA$$

Los tres espectros de aceleración de la figura (II. 4) corresponden a acelerogramas de sismos de características diferentes. El caso a) se refiere a un sismo de mediana intensidad registrado muy cerca del epicentro; las ordenadas espectrales son muy grandes sólo para sistemas con períodos muy cortos y al aumentar el período del sistema, la respuesta disminuye rápidamente. Para un terremoto de gran magnitud registrado a una distancia moderada (caso b), se tienen ordenadas altas en un intervalo de grandes períodos, mientras que para un sismo registrado a gran distancia en terreno blando (caso c), las ordenadas mayores corresponden a períodos grandes. Lo anterior refleja el contenido de frecuencias de cada acelerograma. Las ordenadas espectrales altas corresponden al intervalo de períodos dominantes en el acelerograma, ya que cuando el sistema de un grado de libertad tiene períodos cercanos a aquellos que dominan en el acelerograma, la respuesta máxima se amplifica notablemente debido a la resonancia. Así un sismo de magnitud no muy grande registrado cerca del epicentro tiene períodos dominantes muy cortos y producirá los efectos mayores en estructuras cuyo período fundamental es también corto, que son las muy rígidas, ya que $T = 2\pi\sqrt{m/k}$. Un sismo de gran magnitud a distancias intermedias tiene un efecto importante dentro de un amplio intervalo de períodos y por tanto será muy desfavorable tanto para las estructuras relativamente rígidas, como para aquellas flexibles. Finalmente, en un sismo a gran distancia y terreno blando, predominan movimientos de período grande y por tanto, se afectarán mayormente las estructuras altas y flexibles.

Aceleración absoluta en cm/seg^2



Aceleración absoluta (GALS)



Aceleración absoluta (GALS)

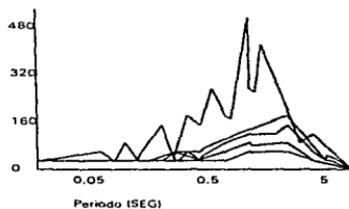


FIGURA 1. 4. ESPECTROS DE ACELERACIONES DE DIFERENTES REGISTROS SISMICOS

Quando el periodo del sistema tiende a cero, la ordenada espectral tiende a la aceleración máxima del terreno. Se aprecia en la figura que, por ejemplo, para un sismo que tuvo una aceleración máxima del terreno de aproximadamente $400 \text{ cm}/\text{seg}^2$, se inducen en un sistema con 5% de amortiguamiento aceleraciones que llegan al doble de la máxima del terreno, para un valor particular del periodo. Esto implica que las fuerzas de inercia para las cuales se debe diseñar una estructura correspondiente a aceleraciones varias veces superiores a las que experimenta el terreno.

Una estructura no se debe diseñar para resistir un sólo sismo, sino el conjunto de sismos que pueden afectarla en su vida útil. Aún para sismos de iguales características en cuanto a magnitud y distancia epicentral, el espectro de respuesta puede variar significativamente debido a diferencias en contenidos de frecuencias y en duración. La estructura deberá diseñarse para la envolvente de los espectros que corresponden a diferentes sismos.

Existen varias reglas empíricas para construir envolventes de espectros a partir de datos básicos del movimiento del terreno. Estas reglas consisten en multiplicar la aceleración, velocidad y desplazamiento máximo del terreno por constantes que se han obtenido de la observación de un gran número de espectros de sismos reales. El valor de estas constantes depende del grado de amortiguamiento del sistema. Para estructuras de edificios urbanos y para muchas estructuras industriales, es apreciable considerar un amortiguamiento de 5 por ciento del crítico y en esa hipótesis están basados los espectros de diseño especificados por la mayoría de las normas de diseño. Hay que tener en mente, sin embargo, que algunas estructuras pueden tener amortiguamientos sensiblemente menores que el 5 por ciento y, por tanto su respuesta puede ser más desfavorable que en la especificada por las normas. Por ejemplo, parte del amortiguamiento considerado se atribuye, más que a fricción interna en el material estructural, a fricción entre la estructura y los elementos no estructurales; por consiguiente estructuras de tipo industrial que no cuentan con muros divisorios y de fachada que contribuyen a dicho amortiguamiento, pueden tener coeficientes de amortiguamiento del orden del 2 por ciento, para los cuales la respuesta se incrementa en más del 50 por ciento con respecto al caso en que el amortiguamiento es de 5 por ciento.

Las reglas más comúnmente usadas para la construcción de envolventes de espectros para diseño son debidas a Newmark y consideran exclusivamente estructuras desplantadas sobre suelo firme. En la propuesta del código ATC-3 las reglas originales fueron modificadas para considerar otro tipo de suelo. Según este documento, la envolvente de espectros para amortiguamiento de 5 por ciento puede construirse con la expresión siguiente:

$$S_A/g = 0.016V_1 S/T^{(2/3)} < 2.5 A_1/g$$

En que S_A/g es la ordenada espectral expresada como fracción de la aceleración de la gravedad; V_1 (cm/seg) y A_1 (cm/seg²) son la velocidad y aceleración

máxima del terreno, respectivamente; T es el periodo del sistema, en seg, y S un factor que depende del tipo de suelo, y para el cual el ATC propone

$S = 1$ para roca o terreno firme sobre roca (S1).

$S = 1.2$ para suelos granulares o suelos cohesivos compactos (S2).

$S = 1.5$ para suelos de mediana o alta compresibilidad (S3).

La figura (I. 5) muestra los espectros de diseño que resultan según estas reglas para las tres condiciones de suelo.

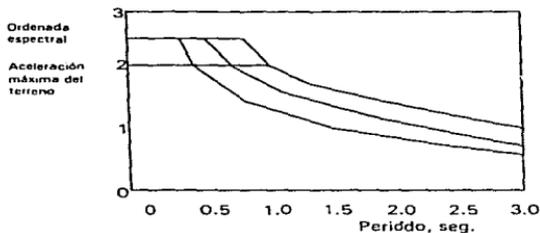


FIGURA I. 5. ESPECTROS DE DISEÑO PARA DISTINTOS TIPOS DE SUELO

Esta forma de construir los espectros sobrestima la respuesta para sistemas de períodos cortos en los que la aceleración máxima debe tender a la del terreno. Por otra parte el factor de incremento de la respuesta de los suelos menos rígidos, S, refleja la amplificación que se tiene para terrenos compresibles los componentes de periodo alto del movimiento del terreno.

I. 2. ESTUDIOS TOPOGRÁFICOS

I. 2. 1. GEOMETRÍA DE LA CUENCA: Para conocer la geometría de la cuenca es necesario hacer una serie de levantamientos, primero con el fin de elegir un sitio apropiado para la localización de la presa y segundo para conocer los volúmenes que podremos utilizar. Existen sólo dos tipos de levantamientos, los topográficos y los geodésicos. Los primeros son aquellos que por abarcar superficies reducidas pueden hacerse despreciando la curvatura de la Tierra. Los levantamientos geodésicos son levantamientos en grandes extensiones que hacen necesario considerar la curvatura de la Tierra, este tipo de levantamientos no son necesarios en el caso de un Proyecto Hidroeléctrico, pues abarca un área lo suficientemente pequeña como para trabajar con levantamientos topográficos.

Dentro de los levantamientos Topográficos se encuentran:

- 1.- Levantamientos de terrenos en general.- Tienen por objeto marcar linderos o localizarlos, medir y dividir superficies, ubicar terrenos en planos generales ligando con levantamientos anteriores, ó proyectar obras y construcciones.
- 2.- Topografía de Vías de Comunicación.- Es la que sirve para estudiar y construir caminos, ferrocarriles, canales, líneas de transmisión, acueductos, etc.
- 3.- Topografía de Minas.- Tiene por objeto fijar y controlar la posición de los trabajos subterráneos y relacionarlos en obras superficiales.
- 4.- Levantamientos Catastrales.- Son los que se hacen en ciudades, zonas urbanas y municipios para fijar linderos o estudiar las obras urbanas.
- 5.- Levantamientos Aéreos.- Son los que se hacen por medio de la fotografía, generalmente desde aviones, y se usan como auxiliares muy valiosos de todas las otras clases de levantamientos. La Fotogrametría se dedica especialmente al estudio de estos trabajos.

La Teoría de la Topografía se basa esencialmente en la Geometría Plana, Geometría del Espacio, Trigonometría y Matemáticas en general. Además del conocimiento de estas materias se hacen necesarias algunas cualidades personales, como por ejemplo: habilidad para manejar los aparatos, criterio general, etc.

PRECISIÓN.- Todas las operaciones en topografía están sujetas a las imperfecciones propias de los aparatos y a las imperfecciones en el manejo de ellos, por lo tanto, ninguna medida en Topografía es exacta, es por eso que la naturaleza y magnitud de los errores deben ser comprendidas para obtener buenos resultados.

Las equivocaciones, a diferencia de los errores, son producidas por la falta de cuidado, distracciones o falta de conocimientos, y no pueden controlarse y estudiarse.

COMPROBACIONES.- Siempre en todo trabajo de Topografía se debe buscar la manera de comprobar las medidas y los cálculos ejecutados. Esto tiene por objeto descubrir equivocaciones y errores y determinar el grado de precisión obtenida.

NOTAS DE CAMPO.- Es la parte más importante del trabajo de campo en Topografía. Las notas de campo deben siempre tomarse en libretas de campo especiales de registro, y con toda claridad para evitar el tener que pasarlas posteriormente, es decir, se toman en limpio. Deben incluirse la mayor cantidad de datos complementarios posibles para evitar confusiones o malas interpretaciones, ya que es muy común que los cálculos o dibujos los hagan personas diferentes a las encargadas del trabajo en campo.

Para la construcción de una presa, se necesitan hacer todos los tipos de levantamientos, en algunas partes (como la zona del vaso de almacenamiento) no es necesario conocer muy a detalle la topografía del lugar, por lo que se puede recurrir a levantamientos aéreos, pero en donde se ubicarán las obras se requiere conocer bien la topografía del lugar, por esto se requiere ir a campo a hacer el levantamiento.

En realidad primero se tiene una topografía general de la zona donde queramos ubicar el proyecto, luego se estudian varias alternativas y se escoge la geometría de la cuenca más favorable, luego, de ser necesario se hacen levantamientos que nos proporcionen una mejor aproximación de la topografía del lugar, disminuyendo los errores y aumentando la precisión.

1. 2. 2. GEOMETRÍA DE LA BOQUILLA: En este aspecto, no hay mucho que decir, se necesita un lugar que permita un almacenamiento grande, que permita un remanso sin derrames a lugares no deseádós y que sea lo más estrecho posible para ocupar poco material. Se requiere conocer la topografía de la boquilla a detalle, con mucha precisión, pues con esta topografía se calculará el volumen de material a utilizar. No es suficiente conocer la topografía de la boquilla en su forma original, también se debe hacer un segundo levantamiento una vez que se haya efectuado el desmonte y el despálme para conocer las dimensiones reales del terreno donde se va a trabajar para poder hacer diseños adecuados de la cortina y su desplante o de elementos adicionales que pudieran necesitarse (como las tablaestacas). Una vez elegido el lugar para la colocación de la cortina y antes de hacer trabajos de preparación del terreno, se deben hacer estudios de mecánica de suelos para conocer la resistencia del terreno con esto se pueden tomar datos para evaluar diferentes alternativas de lugares propuestos comparando el costo de la obra (quizá sea más económico un lugar donde se utilice más material pero la cimentación no sea muy costosa). Por lo anterior se requiere conocer una extensión grande para poder proponer un número suficiente de alternativas para colocar la cortina.

I. 1. 3 ESTUDIOS HIDROLÓGICOS

I. 1. 3. ÁREA DE LA CUENCA: El carácter hidrológico de una cuenca contribuye considerablemente a formar sus características físicas. Se podría suponer que esa interrelación debería suministrar la base para mecanismos cuantitativos con el fin de predecir la respuesta hidrológica a partir de aquellos parámetros físicos que son fáciles de medir. Aunque se han podido desarrollar algunas relaciones útiles, hasta el momento los resultados son más cualitativos que cuantitativos.

La dificultad en relacionar las características físicas e hidrológicas de la cuenca se debe a un gran número de factores. La determinación precisa de las características físicas de una cuenca está limitada por la disponibilidad de mapas que, en general, son de diferentes escalas y están hechos con estándares cartográficos diferentes de manera que un mismo parámetro puede tener diferentes valores de acuerdo con el mapa del cual se ha obtenido. Para otros parámetros, las definiciones son arbitrarias, de modo que existe la posibilidad de que aún no se hayan logrado las definiciones más apropiadas. Finalmente, es claro que la relación entre las características físicas, prácticamente estáticas, de la cuenca y las características hidrológicas, altamente escolásticas, de la misma, deben ser de gran complejidad. Por consiguiente, cabe pensar que simplemente no ha sido posible aún obtener las relaciones más adecuadas.

PARÁMETROS FÍSICOS DEL ÁREA DE LA CUENCA. Dentro del análisis hidrológico se han propuesto muchas formas numéricas para describir las diferentes características de una cuenca hidrográfica. En los siguientes párrafos se describen algunas que tienen relevancia especial en hidrología.

Número de orden de un cauce Horton seguirá la clasificación de cauces de acuerdo al *número de orden de un río* como una medida de la ramificación del cauce principal en una cuenca hidrográfica. Un río de primer orden es un tributario pequeño sin ramificaciones. Un río de segundo orden es uno que posee solamente ramificaciones de primer orden. El orden de una cuenca hidrográfica está dado por el número de orden del cauce principal.

El número de orden es extremadamente sensitivo a la escala de un mapa utilizado. Un estudio cuidadoso de fotografías aéreas demuestra, generalmente, la existencia del buen número de cauces de orden inferior (en general cárcavas, zanjas y otros canales intermitentes) muy superior a los que aparecen en un mapa estándar de escala 1:24,000. Los mapas a esta escala, por otra parte, muestran dos o tres órdenes más que la escala siguiente de 1:62,500. Los mapas estándar presentan incluso grandes diferencias en la propia delineación de los ríos. De esta manera, cuando se va a utilizar este parámetro con propósitos comparativos es necesario definirlo cuidadosamente. En ciertos casos puede ser preferible hacer ajustes de los estimativos iniciales mediante comprobaciones de terreno para algunos tributarios pequeños.

Horton también introdujo el concepto de la *relación de bifurcación* para definir la relación entre el número de ríos de cualquier orden y magnitud y el número de cauces en el siguiente orden inferior. Las relaciones de bifurcación dentro de una

cuenca tienden a ser de la misma magnitud; generalmente, valores entre 2 y 4 con un valor promedio de 3.5. Esta observación condujo a la postulación de la *ley del número de orden de los ríos*:

$$N_u = r_b^{(k-u)}$$

donde N_u es el número de cauces de orden u , r_b es la relación de bifurcación y k es el número de orden del cauce principal. En forma similar, Horton sugirió la ley de longitudes de los cauces:

$$L_u = L_1 r_l^{(u-1)}$$

donde L es la longitud promedio de los cauces de orden u y r_l es la relación de longitudes. Una ecuación equivalente puede aplicarse también al área A de las cuencas de orden u :

$$A_u = A_1 r_a^{(u-1)}$$

Las primeras dos ecuaciones indican una progresión geométrica de número, longitud y área. Gráficamente, estas relaciones sugieren una relación lineal entre el número de orden y los logaritmos del número de cauces, la longitud o el área. Estas relaciones han sido confirmadas bajo un amplio rango de condiciones y las ecuaciones pueden ser utilizadas para estimar los valores N , L y A para los tributarios pequeños midiendo los valores correspondientes para los cauces de los dos órdenes superiores.

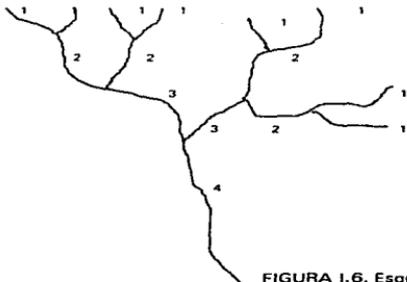


FIGURA I.6. Esquema de definición para el número de orden de un río

DENSIDAD DE DRENAJE. La longitud total de los cauces dentro de una cuenca dividida por el área total de drenaje, define la *densidad de drenaje* o la longitud de canales por unidad de área. Una densidad alta refleja una cuenca muy bien drenada que debería responder relativamente rápido al influjo de la precipitación; una cuenca con baja densidad refleja un área pobremente drenada con respuesta hidrológica muy lenta. Los valores observados de la densidad de drenaje varían desde 3 en algunas regiones hasta 400 o más. En sitios donde los materiales del suelo son resistentes a la erosión o muy permeables y donde el relieve es bajo, ocurren densidades de drenaje bajas. Los valores altos de densidad reflejan generalmente áreas con suelos fácilmente erosionables o relativamente impermeables, con pendientes fuertes y escasa cobertura vegetal.

LONGITUD DEL FLUJO DE SUPERFICIE. La longitud promedio del flujo de superficie L_s puede obtenerse de manera aproximada por medio de la ecuación:

$$L_s = 1/2D$$

donde D es la densidad de drenaje. La ecuación ignora los efectos de pendiente del terreno y de los cauces, que tienden a alargar la trayectoria del flujo de superficie. El error posiblemente tiene poca importancia. Horton sugirió que el denominador de la ecuación fuera multiplicado por $\sqrt{1 - (S_c/S_p)}$, donde S_c y S_p son las pendientes promedio de los canales y de la superficie del terreno respectivamente. Esta modificación reduce el error de aproximación inherente en la ecuación.

RELACIÓN DEL ÁREA. Las observaciones en un buen número de cauces alrededor del mundo parecen comprobar la existencia de la relación de la forma:

$$L = 1.27A^{0.6}$$

donde L es la longitud del canal principal en kilómetros y A es el área de drenaje de la cuenca en kilómetros cuadrados. El exponente varía entre 0.6 y 0.7 y sugiere que a medida que las cuencas se hacen más extensas tienden a ser más alargadas. El coeficiente de la ecuación es igual a 1.4 cuando las dimensiones se toman en millas.

FORMA DE LA CUENCA. La forma de la cuenca hidrográfica afecta los hidrogramas de escorrentía y las tasas de flujo máximo. Se han hecho numerosos esfuerzos para tratar de descubrir el efecto de la forma por medio de un solo valor numérico. La mayoría de las cuencas tienden a tener la forma de una pera; sin embargo, los controles geológicos conducen a numerosas desviaciones a partir de esta forma. Horton sugirió un valor adimensional, R_f , como índice de la forma de la cuenca según la ecuación:

$$R_f = A/L_s^2$$

donde A es el área de la cuenca y L_s es la longitud de la misma, medida desde la salida hasta el límite de la hoya, cerca de la cabecera del cauce más largo, a lo

largo de una línea recta. Este índice o su recíproco han sido usados extensamente como indicadores de la forma del hidrograma unitario.

La ecuación no implica una suposición especial de la forma de la cuenca. Para un círculo $R_r = \pi/4 = 0.79$; para un cuadrado, con la salida en el punto medio de los lados, $R_r = 1$; y para el cuadrado con salida en una esquina $R_r = 0.5$. Los valores correspondientes para otras formas geométricas se puede deducir fácilmente. Varios autores han sugerido el uso de un círculo o de una lemniscata como forma de referencia. Los factores de forma resultantes se reducen al parámetro R_r de Horton multiplicado por una constante.

PARÁMETROS DEL RELIEVE DE UNA CUENCA. La topografía o relieve de una cuenca puede tener más influencia sobre la respuesta hidrológica que la forma de la misma.

PENDIENTE DEL CANAL. La pendiente de un canal influye sobre la velocidad de flujo, y debe jugar un papel importante en la forma del hidrograma. Los perfiles típicos de los cauces naturales son cóncavos hacia arriba; además todas las cuencas con excepción de las más pequeñas, tienen varios canales cada uno con un perfil diferente. Por esta razón la definición de la pendiente por medio de un cauce en una cuenca es muy difícil. Por lo general sólo se considera la pendiente del cauce principal. La forma más simple y más usada de medir la pendiente del cauce es la de obtener la pendiente de una línea, AB dibujada de modo que el área bajo ella sea igual a l área bajo el perfil del cauce principal. Taylor y Schwarz utilizaron la pendiente de un canal uniforme de la misma longitud y distribución temporal del cauce principal. Puesto que la velocidad es proporcional a la raíz cuadrada de la pendiente, este proceso equivale a ponderar segmentos del cauce de acuerdo con la raíz cuadrada de sus pendientes, lo cual da relativamente menor peso a las partes de la zona más alta del cauce. De acuerdo con esto, si el canal estuviere dividido en n partes iguales, cada uno con pendiente s_i , un índice simple de la pendiente del cauce sería:

$$R_s = (\sum_{i=1}^n s_i / n)^2$$

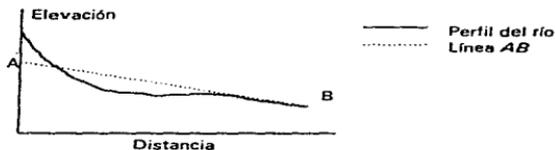


FIGURA 1. 7. MÉTODO PARA DEFINIR LA PENDIENTE DE UN CANAL

PENDIENTE DEL TERRENO. La pendiente del terreno es un factor importante en el flujo de superficie y es por lo tanto un parámetro hidrológico de interés, particularmente en hoya pequeñas donde los procesos de flujo de superficie pueden

ser el factor dominante en la determinación de la forma del hidrograma. Dada la variación considerable de la pendiente del terreno en una hoya típica, es necesario definir un índice promedio que la represente.

La distribución de la pendiente del terreno puede determinarse estableciendo una red o un conjunto de puntos localizados al azar. Es posible entonces calcular la media, la mediana y la varianza de la distribución resultante. En este proceso, la precisión de los resultados depende de la calidad del mapa utilizado.

INFORMACIÓN DE ÁREA - ELEVACIÓN. Cuando uno o más factores de interés en la hoya dependen de la elevación, es útil saber como está distribuida la hoya en función de la elevación. Una curva del *área - elevación* (o curva hipsométrica) se puede construir midiendo con un planímetro el área entre contornos de un mapa topográfico y representando en una gráfica la elevación el área acumulada por encima o por debajo de una cierta elevación. En algunos casos es conveniente utilizar el porcentaje del área total en vez de su valor absoluto, particularmente cuando se desea una comparación entre varias cuencas. Si se superpone una red de 100 o más intersecciones sobre la cuenca, y se mide el número de intersecciones de la red de cada rango de elevaciones, es posible determinar la curva hipsométrica en forma casi tan aproximada como en el método del planímetro con sólo una fracción del esfuerzo necesario en el primer caso.

La siguiente figura muestra una curva hipsométrica típica correspondiente a una cuenca hidrográfica madura:

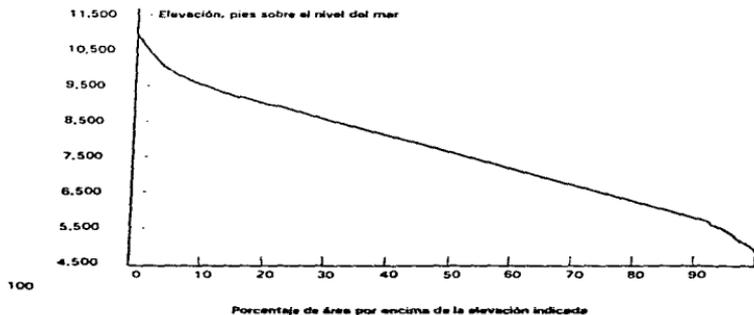


FIGURA I. 8. CURVA ISOMÉTRICA TÍPICA

Las cuencas muy pequeñas, sin embargo, pueden mostrar características muy diferentes. Los cálculos de fusión de nieves en áreas montañosas deben realizarse generalmente para zonas de diferente elevación, dado que tanto el espesor de la nieve como la temperatura varían con la altura. La precipitación en áreas montañosas puede ponderarse algunas veces por medio de la elevación cuando se esté calculando la precipitación promedio de la cuenca.

1. 3. 2. ESCURRIMIENTOS. La ingeniería hidrológica se preocupa principalmente de tres características de los caudales de un río: Volúmenes mensuales y anuales disponibles para almacenamiento y utilización; los períodos de estiaje, que limitan la utilización del agua de las corrientes, y las avenidas. En general son de mucha importancia los análisis de los hidrogramas de crecientes en cuanto a atenuación del daño por inundaciones, predicción de avenidas o para fijar las descargas de diseño de un gran número de estructuras que deben transportar el agua proveniente de avenidas.

CARACTERÍSTICAS DEL HIDROGRAMA. Las aguas que componen la corriente de un río pueden llegar al cauce por uno de los varios caminos disponibles desde que llega a la tierra en forma de precipitación. Una porción del agua fluye sobre la superficie del suelo formando la *escorrentía superficial* y llega al cauce poco después de su aparición en forma de lluvia. Otra porción del agua se infiltra a través de la superficie del suelo y fluye por debajo de ésta hacia el cauce. Esta porción del agua se desplaza más lentamente que la escorrentía superficial y contribuye a mantener el caudal en el río durante los períodos de sequía. En los estudios hidrológicos en los cuales está involucrado el caudal de un río es necesario hacer una distinción entre estas componentes del flujo total. El primer paso en tales estudios es dividir los hidrogramas observados en sus componentes, antes de analizar la relación entre precipitación y escorrentía, determinando la forma característica de los hidrogramas para una hoya, o estudiando las características de los períodos de estiaje.

COMPONENTES DE LA ESCORRENTÍA. El camino de una gota de agua desde el momento en el que el caudal alcanza la tierra hasta cuando llega al cauce de una corriente es incierto. Es conveniente imaginar tres caminos principales: escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y flujo de aguas subterránea.

El flujo de agua sobre la tierra, o *escorrentía superficial*, corresponde al volumen de agua que avanza sobre la superficie de la tierra hasta alcanzar un canal. La palabra canal, tal como se utiliza aquí significa cualquier depresión que pueda transportar una pequeña corriente de agua en flujo turbulento durante una lluvia y durante un período corto después de su terminación. Tales canales son numerosos, y la distancia que el agua puede viajar como escorrentía superficial es relativamente corta, siendo raras veces mayor que algunas decenas de metros. Por esta razón, la escorrentía superficial llega al canal prontamente, y si ocurre en cantidad suficiente, es un elemento importante en la formación de las crecientes. Sin embargo, la cantidad de escorrentía superficial de los picos de las crecientes. Sin tener lugar cuando la intensidad de lluvia es mayor que la capacidad de infiltración. En lluvias moderadas o de mediana magnitud, la escorrentía superficial puede provenir únicamente de las regiones impermeables de las hoyas o de la precipitación que cae directamente sobre las superficies de agua de la hoya. Con excepción de las zonas urbanas, el total de área impermeable y de zonas con superficies de agua representa una fracción pequeña del área total de la hoya. De aquí que la escorrentía superficial sea un factor importante en las corrientes de agua únicamente como resultado de lluvias de gran intensidad.

Una porción de agua que se infiltra a través de la superficie de la tierra puede moverse lateralmente en las capas superiores del suelo hasta llegar al cauce de la corriente. Esta agua es llamada *escorrentía subsuperficial*, se mueve más lentamente que la escorrentía superficial y alcanza las corrientes posteriormente. La fracción total de la escorrentía que se presenta como flujo subsuperficial, depende de la geología de la hoya. Una capa de suelo poco profunda que cubra una formación rocosa o un conglomerado cementado, o tierra arada a una pequeña profundidad favorecen la percolación hacia la zona de agua subterránea. A pesar de viajar más lentamente que la escorrentía superficial, la escorrentía subsuperficial puede ser mayor en cantidad, especialmente en lluvias de intensidad moderada, razón por la cual puede ser éste el factor más importante en los ascensos menores de los hidrogramas.

Una parte de la precipitación puede percolarse hasta llegar al nivel freático. Este aumento en el agua subterránea puede descargarse eventualmente en las corrientes como *flujo de agua subterránea* (también llamado *flujo base* o *descarga de estiaje*) si el nivel freático intersecta los cauces de las corrientes de la hoya. La contribución de agua subterránea a las corrientes de agua no pueden fluctuar rápidamente debido a la baja velocidad del flujo. En algunas regiones se necesitan más de dos años para que el efecto de un aumento en el agua subterránea descargue en las corrientes.

Las hoyas con suelos superficiales permeables y depósitos grandes de agua subterránea efluente muestran caudales altos sometida a lo largo del año. Con una relación relativamente baja entre caudales de avenida y caudales medios. Las hoyas con suelos superficiales de baja permeabilidad o con volúmenes de afluente de agua subterránea presentan relaciones más altas entre caudales pico y promedio con caudales muy bajos o nulos entre crecientes.

Las distinciones presentadas entre las tres componentes de flujo son arbitrarias. El agua puede comenzar su viaje como escorrentía superficial, infiltrándose desde la lámina de agua superficial y completar su viaje hasta la corriente como escorrentía subsuperficial. Por otro lado, la escorrentía subsuperficial puede aflorar a la superficie cuando un estrato relativamente impermeable intersecte a las faldas de una colina y así terminar su recorrido hacia la corriente escorrentía superficial. La descripción de escorrentía subsuperficial es en muchos aspectos similar a la del agua subterránea emperchada. Ciertamente lo que aquí se describe como escorrentía subsuperficial se diferencia del agua subterránea únicamente en lo relacionado con la velocidad de viaje. En terrenos con calizas, el agua subterránea no se mueve a velocidades relativamente altas y con flujo turbulento a lo largo de los canales y fracturas que presentan las calizas. Las corrientes en terrenos compuestos por calizas, a menudo presentan una relación alta entre descargas pico y promedio, siendo ésta una condición característica de las corrientes con aportes bajos de agua subterránea. En tales terrenos, el flujo de agua subterránea tiene algunas características adscritas a la escorrentía subsuperficial. Por conveniencia, ha sido costumbre considerar el flujo total como compuesto únicamente de dos partes: *escorrentía directa* o de *creciente* y *flujo base*. La distinción se hace realmente sobre la base del tiempo de llegada a la corriente y no con relación al camino seguido. Se

presume que la escorrentía directa consiste de flujo superficial y una parte sustancial de la escorrentía subsuperficial, mientras que el flujo base es considerado como compuesto de agua subterránea en su mayoría. Las técnicas de simulación por computadora utilizan comúnmente todas las componentes.

RECESIÓN DEL FLUJO EN CORRIENTES. Un hidrograma típico, resultante de un período aislado de lluvia consta de una rama ascendente, un segmento de cresta y una rama descendente o recesión. La forma de la rama ascendente está influenciada principalmente por las características de lluvia que causa el ascenso. Se supone a menudo que el punto de inflexión en el lado descendente del hidrograma coincide con el tiempo al cabo del cual cesa la escorrentía superficial hacia el sistema de canales. De ahí en adelante, la curva de recesión representa el aporte de agua almacenada dentro de la hoya. La forma de la recesión es bastante independiente de las características de la lluvia que causó el ascenso. En las hoyas grandes, en las cuales la escorrentía que produce una lluvia se genera únicamente sobre una parte del área, la recesión puede variar de una tormenta a otra, dependiendo del área particular que genera la escorrentía. Si la lluvia ocurre mientras la recesión de una tormenta anterior se está llevando a cabo, puede esperarse que la recesión se distorsione. Sin embargo, la curva de recesión de una hoya es una herramienta muy útil en hidrología.

La *curva de recesión* de una hoya, (algunas veces llamada *curva de abatimiento*), puesto que representa la disminución del volumen de agua almacenado), se describe por la ecuación característica de recesión:

$$q_1 = q_0 K_r$$

en donde q_0 es el caudal en cualquier momento, q_1 es el caudal en la unidad de tiempo después, K_r es la constante de recesión que toma un valor menor que la unidad. La ecuación anterior puede escribirse de un modo más general como:

$$q_t = q_0 K_r^t$$

en donde q_t es el caudal t unidades de tiempo después de q_0 . Frecuentemente la unidad de tiempo que se toma es 24 horas, aunque en hoyas pequeñas puede ser necesario utilizar unidades de tiempo más cortas. El valor de K_r depende de la unidad de tiempo seleccionada. Integrando la ecuación, y teniendo presente que el volumen de agua descargado durante un intervalo de tiempo dt es $q dt$ y que es igual a la disminución del volumen remanente almacenado en la hoya S_r , al cabo de un tiempo t es:

$$S_r = - q \ln K_r$$

La segunda ecuación aparecerá como una línea recta en papel semilogarítmico con q en la escala logarítmica. Si la recesión de una corriente se representa en papel semilogarítmico, el resultado no será en general una línea recta sino una curva con una pendiente decreciente, es decir, valores crecientes de K_r . La razón de esto es que el agua proveniente de los tres diferentes tipos de almacenamiento - de los cauces de las corrientes, del suelo superficial y del agua subterránea - tienen cada

uno diferentes características de retardo. Barnes sugiere que la recesión se puede aproximar por tres líneas rectas en un gráfico, es difícil seleccionar los puntos de cambio de pendiente. Considerando la heterogeneidad de una hoya típica, éste no es un resultado sorprendente. Algunos acuíferos pueden contribuir con agua subterránea mientras esté sucediendo infiltración afluyente en otros puntos de la corriente. En la mayoría de los casos, la escorrentía se presenta en cantidades variantes sobre la hoya.

La pendiente de la última parte de la recesión debería representar el valor característico de K , del agua subterránea puesto que, presumiblemente, tanto la escorrentía superficial como la subsuperficial ya han terminado. Proyectando esa pendiente hacia atrás en el tiempo y representando un nuevo gráfico la diferencia entre la línea proyectada y el hidrograma total, puede obtenerse una recesión que consiste en su mayoría de escorrentía subsuperficial. Con la pendiente aplicable a la escorrentía subsuperficial determinada de ésta manera se puede repetir el proceso para establecer las características de recesión de la escorrentía superficial.

La técnica descrita anteriormente representa un grado de refinamiento raramente utilizado en problemas de ingeniería. Es posible obtener una curva de recesión haciendo un gráfico de valores de q , contra valores de q_0 , un intervalo de tiempo t más tarde. Si la primera ecuación fuese absolutamente correcta, los valores representados indicarían una línea recta; sin embargo, normalmente se obtiene una curva indicando un cambio gradual en K . Esta curva es asíntótica a una línea recta de 45 grados cuando q tiende a cero.

Este método puede utilizarse para construir curvas de recesión para flujo base o escorrentía directa. Para la recesión del flujo base, los datos deben seleccionarse de algunos días posteriores al pico de la crecida, de tal manera que sea razonablemente cierto el hecho de que no se incluya escorrentía directa. Después que la recesión del flujo base ha sido determinada, ésta puede proyectarse hacia atrás bajo el hidrograma que sigue al pico de crecida, y la diferencia entre el flujo base proyectado y el hidrograma total puede utilizarse para desarrollar una curva de recesión de escorrentía directa. Es costumbre dibujar la curva de flujo base como la envolvente de los valores graficados sobre la derecha, debido a que tal curva representa la recesión más lenta (valor alto de K) y los puntos que se alejan hacia la izquierda pueden incluir la escorrentía directa. Con un argumento semejante, los datos para la recesión de escorrentía directa son los de la izquierda. (Ver figuras en la página siguiente).

CAPÍTULO II
CONSTRUCCIÓN DE UNA PRESA HIDROELÉCTRICA

II. CONSTRUCCIÓN DE UNA PRESA HIDROELÉCTRICA

II. 4. VASO DE ALMACENAMIENTO

II. 4. 1. ELEVACIONES: NAMO, NAMINO, NAME: Una vez seleccionado el sitio para construir una cortina, las dimensiones de la presa están supeditadas tanto a los volúmenes que aporta el río como a las demandas de energía que requiera el sistema. Desde luego, la altura y el tipo de cortina están limitados por la topografía y geología del lugar, pero si se hace referencia únicamente a los factores hidráulicos, son sin duda las aportaciones y demandas las que definen el proyecto.

El comportamiento de un río se conocerá mejor si los registros históricos de sus estaciones hidrométricas son más extensos. La hidrología propone métodos para deducir escurrimientos (como los descritos en el capítulo anterior) e inclusive generar escurrimientos probables utilizando métodos estocásticos. Lo importante es tener datos de aportaciones a la presa para simular su funcionamiento, confrontándolos con una política de demandas y un criterio de operación.

Una vez definidas las aportaciones, es posible realizar las simulaciones mencionadas y al analizar los resultados, determinar los parámetros principales, como son: el volumen de almacenamiento, la capacidad del vertedor y de la obra de toma, los niveles de operación, la capacidad de regulación del vaso y, por supuesto, por tratarse de una central hidroeléctrica, la potencia por instalar y la generación esperada.

CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE UNA HIDROELÉCTRICA, NIVELES DE OPERACIÓN. Tanto la capacidad del embalse como los niveles de operación se determinan simulando las condiciones en que trabajará la planta. Para esto, como anteriormente se precisó, es necesario controlar las aportaciones del proyecto con las características topográficas del vaso y con las extracciones. Estas últimas están definidas por la demanda o por algún criterio de operación especificado después de analizar todo el sistema.

Antiguamente se utilizaba el método de la curva masa para confrontar las aportaciones con las demandas. Este procedimiento tuvo su importancia, como todos los métodos gráficos, antes de que aparecieran las computadoras, ya que eliminaba una gran cantidad de cálculos tediosos. El método sigue usándose para casos menos complicados que una central hidroeléctrica; por ejemplo, al definir la capacidad de un tanque de almacenamiento para un sistema de abastecimiento de agua potable, caso en que tanto las demandas como las aportaciones al tanque son bastante determinísticas y claras.

Para realizar el proyecto de una central hidroeléctrica, por ser una obra costosa, es necesario un gran número de opciones; no sólo son diferentes las políticas de producción y demanda, sino aún las aportaciones del río que se utilizarán como datos de entrada. Esto implica un volumen considerable de cálculos repetitivos para los que la computadora es sin duda el instrumento más adecuado.

Las aportaciones que se utilizan en la simulación pueden ser de dos tipos:

1. Registros históricos de escurrimientos.
2. Escurrimientos generados con procedimientos estocásticos, basados en las características estadísticas de los registros históricos.

En el primer criterio presupone que los escurrimientos registrados, o unos muy parecidos se presentarán nuevamente. Este método será tanto mejor cuanto más largo y confiable sea el registro disponible. Sin embargo, no debe caerse en el error de creer que los escurrimientos registrados se repetirán exactamente, ya que esta consideración puede llevar a desagradables sorpresas. En efecto, aun cuando hubiera ciclos repetitivos (que no los hay, según indican los registros analizados por los hidrólogos), es imposible saber a que parte de la muestra hidrológica corresponde el registro disponible.

Es de todos conocida la tendencia a que haya mayores gastos en los ríos durante épocas más o menos previstas, es decir, períodos de lluvias (o de deshielo en algunos lugares), y también a que haya períodos secos en la época llamada de estiaje. Pero ni las fechas de cada periodo, ni mucho menos las magnitudes de los volúmenes, pueden predecirse con exactitud.

El segundo criterio permite "generar" escurrimientos tan factibles como los registrados y del tamaño que se desee, por ejemplo: 500, 1000 años o más. Con esta información, los resultados de la simulación permitirán estimar algunas de las posibles formas de comportamiento del vaso. La utilización de escurrimientos sintéticos no está en desventaja en relación con el uso de registros históricos porque, como se dijo antes, no hay ninguna razón para garantizar que dichos registros sean representativos. Simplemente, al ser éstos la única información disponible, es lógico apoyarse en ellos para los estudios.

CONSIDERACIONES GENERALES PARA DEFINIR LA CAPACIDAD DE UNA PLANTA HIDROELÉCTRICA.

El volumen que debe tener el vaso creado por la cortina está ligado a varios factores, a saber:

1. Aportaciones del río.

2. Uso principal:

- a) Planta de picos: Se desea potencia, por lo que conviene tener cargas altas.
- b) Planta base. La altura es menos importante que la posibilidad de utilizar un gasto estable

3. Uso secundario:

- a) Control de avenidas. El vaso requiere un volumen mayor del utilizable en condiciones de operación normal, con el único fin de regular las avenidas previstas, de manera que se pueda garantizar que los gastos derramados no sobrepasen el límite considerado peligroso para las poblaciones que se encuentren aguas abajo de la presa.
- b) Riego. Volumen relacionado con las características del suelo disponible y de los cultivos esperados.
- c) Recreación. Navegación, pesca, natación, etc.
- ch) Acuicultura.

4. Limitación de la altura de la cortina:

- a) Geología y sismicidad.
- b) Topografía del sitio y zonas que deben ser inundadas por quedar dentro del vaso (poblaciones, zonas industriales, agrícolas, culturales, etc.).
- c) Evaporaciones. Siendo que a mayor altura de la cortina es mayor la superficie libre del vaso, también lo son las evaporaciones y en ocasiones éstas pueden ser una limitante de consideración.

NIVELES O COTAS DE OPERACIÓN

La siguiente figura presenta el perfil de una planta hidroeléctrica y en ella se indican los llamados *niveles de operación* del vaso. Enseguida se presenta una breve explicación de su significado y de los criterios generales para la localización de dichos niveles.

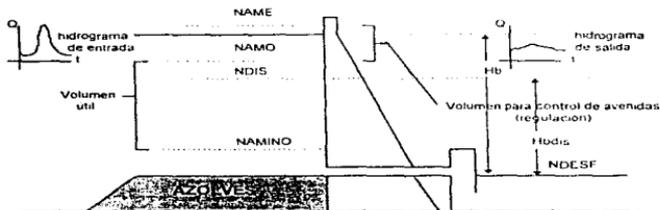


FIGURA II.1 Niveles de operación de una planta hidroeléctrica

NIVEL DE DESFOGUE: Normalmente se toma un valor medio, pero un estudio riguroso exigirá conocer la curva de gastos (*cotas - gastos*) de dicho desfogue.

NAMINO: Nivel de aguas mínimas de operación. Es el límite inferior del nivel del agua en el vaso abajo del cual las turbinas no deben trabajar. El NAMINO está indudablemente relacionado con la altura de la entrada de la obra de toma (*bocatoma*) y se localiza por encima de dicha entrada. De esta manera, se garantiza el ahogamiento mínimo necesario para que no se formen vórtices que permitan la entrada de aire en las turbinas, ya que esto rompería la continuidad de flujo y provocaría que trabajaran anormalmente. Este ahogamiento mínimo aún no se ha definido con suficiente precisión, y desde luego, su determinación requiere de más estudios experimentales, pero un valor comúnmente aceptado es localizar el nivel mínimo de operación por lo menos dos diámetros del túnel sobre la clave del mismo.

En cuanto a la posición de la toma, que señala el límite superior del volumen necesario para que se acumulen los azolves durante la vida útil de la presa, se define precisamente en función de dicha vida útil, la cual normalmente se considera de unos 50 años. El volumen de azolves se determina en base a registros históricos de arrastre de sedimentos en el río y en la posible existencia de presas localizadas aguas arriba del sitio en cuestión y que retienen el material arrastrado.

NDIS NIVEL DE DISEÑO: Este nivel debe ser el que, según los estudios preliminares, se presentará con mayor frecuencia durante el funcionamiento de la planta, y corresponde a la carga para la que deben diseñarse las turbinas y por consiguiente,

trabajar en condiciones óptimas. El NDIS se determina efectuando simulaciones del funcionamiento de una presa y después de realizar un análisis de frecuencia, se escoge el valor que mas se presenta, es decir la "moda" de la distribución de niveles.

NAMO NIVEL MÁXIMO DE AGUAS DE OPERACIÓN. El volumen almacenado aprovechable o "capacidad útil" se encuentra confinado entre este nivel y el NAMINO, se determina en función de la magnitud de las aportaciones del río y del tipo de operación que se asigne a la planta. Por ejemplo, si se desea utilizar cada semana el volumen total del vaso (*regulación semanal*), la capacidad útil corresponderá al volumen del río aportado en una semana aproximadamente.

Lo anterior significa que el NAMO corresponde a la posición máxima de la superficie del agua en el vaso, en condiciones normales de operación. Cuando el nivel del embalse sobrepase al NAMO se considera que se trata de una emergencia y, por tal razón, en este nivel empiezan los derrames, es decir, entra en funcionamiento la obra de excedencias.

NAME: NIVEL DE AGUAS MÁXIMAS EXTRAORDINARIAS. Esta es la posición más elevada del embalse que se acepta en el proyecto. El volumen confinado entre el NAME y el NAMO es la llamada *capacidad de regulación del vaso*. Para fijar el NAME es necesario transitar por el vaso la *avenida de diseño* para el vertedor, que comúnmente corresponde a un periodo de recurrencia de 10,000 años, según el criterio del proyectista. Por razones de seguridad, se supone que la avenida entra en el vaso cuando la superficie coincide con el NAMO y una vez efectuado el tránsito a lo largo del vaso, el NAME es el nivel máximo presentado durante dicho tránsito.

Sobre el NAME se deja un bordo libre de seguridad y así se alcanza la altura máxima de la cortina.

II. 4. 2. CAPACIDAD ÚTIL: NAMO - NAMINO: Como ya se mencionó anteriormente, se encuentra confinado entre los niveles NAMO y NAMINO, y es el volumen de agua que podemos aprovechar, pues si el nivel de agua llega al NAMINO, se tendrán que apagar las turbinas para evitar la entrada de aire a la tubería y provocar desperfectos prematuros tanto en la tubería como en las turbinas, y si el nivel de agua sobrepasa del NAMO, es que se está presentando una avenida y deberá de entrar en operación la obra de excedencias derramando agua.

En muchos proyectos hidroeléctricos, la obra de excedencias es operada por compuertas, esto hace que los niveles NAMO y NAME coincidan, así, en este caso, la capacidad útil queda confinada entre el NAME, que coincide con el NAMO, y el NAMINO. La operación de las compuertas se lleva a cabo según se necesite y se logra aumentar la capacidad útil. Cabe mencionar que existen obras en las cuales nunca se utiliza la obra de excedencias y aunque el diseño no las incluya, se instalan compuertas para aumentar la capacidad útil.

CRITERIO DE SIMULACIÓN PARA PLANTAS HIDROELÉCTRICAS: La determinación de las curvas de demanda que deban tomar las hidroeléctricas está relacionada con las características de las demás plantas del sistema. Los estudios realizados sobre este problema llevan a la conclusión de que, siendo mayor la diversidad de tipos de plantas térmicas que de hidroeléctricas, es más conveniente adaptar las plantas térmicas a la curva de demanda de las hidroeléctricas.

Esto significa que lo más ventajoso es poner en funcionamiento cada hidroeléctrica de manera que se obtenga de todas ellas su máximo provecho como si estuvieran aisladas y, una vez definidas las curvas de producción según el criterio de eficiencia, colocar dichas curvas en la curva de demanda y completar el resto con producción de origen térmico.

Con base en esta idea, en nuestro medio se elaboran anteproyectos de hidroeléctricas que efectúan la simulación bajo el siguiente criterio:

RANGO DE NIVELES	POTENCIA
Nivel del embalse > NAMO	$P = 1.3 P_{dis}^*$
NDIS <= nivel de embalse <= NAMO	$P = P_{dis}$
NAMINO <= nivel de embalse < NDIS	$P = P_{dis}(H/H_{dis})^{3/2}$

* El aumento de 30% a la P_{dis} es variable según el fabricante de la turbina

TABLA II CRITERIO PARA ELABORACIÓN DE ANTEPROYECTOS TOMANDO EN CUENTA LA POTENCIA

Cuando el nivel de la superficie del vaso se encuentra bajo el nivel de diseño, la potencia que se extrae está basada en un criterio de similitud, el cual consiste en hacer trabajar a la máquina en condiciones mecánicamente semejantes a las de diseño (véase apartado II. 7. 5).

La simulación puede realizarse de la siguiente manera:

- 1.- Seleccionar el intervalo de tiempo (hora, día, mes, etc.).
- 2.- Escoger el nivel inicial. Un buen criterio es empezar con el vaso lleno al principio del estiaje, es decir, de manera que el nivel inicial corresponda al NAMO el 1° de noviembre, fecha en que aproximadamente empieza el periodo de estiaje en el país.
- 3.- Calcular: $P = f$ (nivel al principio del intervalo).
- 4.- Calcular: $Q = f(P, H)$ y el volumen extraído durante el intervalo.
- 5.- Calcular la carga media, como un promedio de la inicial y la final del intervalo y si ya se calculó antes, y no difiere sensiblemente con la anterior pasar al punto 7. Si está fuera de tolerancia exigida continuar con el punto siguiente.
- 6.- Regresar a 3 y repetir este punto y los subsecuentes con la carga media del intervalo.
- 7.- Considerar el nivel final como inicial para el siguiente intervalo y pasar al punto 2 hasta terminar el proceso.

Durante la simulación hay dos niveles singulares a saber: el NAMINO y el NAMO, ambos requieren de un tratamiento especial, por lo que enseguida se analizarán dos casos:

- 1.- *Niveles cercanos al NAMINO.* En este caso puede suceder que la extracción calculada de por resultado un nivel final inferior al NAMINO. Como esto no es posible, debe reducirse la extracción de manera que el volumen final sea precisamente el mínimo de operación, aun cuando esto implique utilizar una potencia media menor que la programada.
- 2.- *Niveles cercanos al NAMO.* Si el nivel al final de un intervalo es superior al NAMO, debe corregirse el cálculo descontando los derrames que aparecen cuando la cola de embalse sobrepasa ese nivel.

Para organizar mejor el procedimiento se recomienda hacer un diagrama de flujo del funcionamiento de una planta hidroeléctrica, bajo las condiciones señaladas anteriormente.

II. 4. 3. CAPACIDAD PARA CONTROL DE AVENIDAS: NAME - NAMO. A medida que aumenta el caudal en un río, aumenta también el nivel del agua y con él la cantidad almacenada temporalmente en el canal. Durante la etapa de recesión de la creciente el canal debe producir una cantidad de agua equivalente a este volumen almacenado. Como resultado, una onda de creciente que viaje a lo largo de un canal parece aumentar su tiempo base y (si el volumen permanece constante) rebajar su cresta. Entonces se dice que la onda es atenuada. El *transito de avenidas* es la técnica hidrológica utilizada para calcular el efecto de almacenamiento en un canal sobre la forma y movimiento de una onda de avenida

Dado el caudal o gasto en un punto aguas arriba, el proceso de tránsito puede utilizarse para calcular el caudal en un punto aguas abajo. Los principios del tránsito de avenidas pueden aplicarse también para el cálculo de los efectos en un embalse sobre la forma de una onda de creciente. El almacenamiento hidráulico no solo ocurre dentro de un canal o embalse sino también en el movimiento mismo del agua sobre el terreno. El almacenamiento es pues efectivo durante la propia formación de una onda de avenida y los métodos de tránsito pueden aplicarse para calcular el hidrograma que resultará de un patrón específico de lluvias en exceso.

MOVIMIENTO DE ONDAS: Una de las ondas más simples es la *onda monoclinal ascendente* en un canal uniforme. Tal onda consiste de un flujo uniforme inicial, un periodo de flujo uniforme ascendente y un flujo uniforme a continuación, con el gasto último alcanzado. Si se superpone en este sistema una velocidad u igual y de sentido contrario a la velocidad de una onda u , se produce una onda estacionaria y un flujo constante q' de derecha a izquierda, con las velocidades indicadas en la próxima figura.

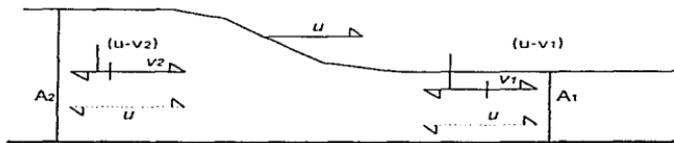


FIGURA II 2 Esquema de definición para el análisis de una onda monoclinal ascendente

Este flujo se conoce como *exceso* y se calcula como:

$$q' = (u-v_1)A_1 = (u-v_2)A_2 \quad \dots(\text{ec. II. 1})$$

donde A es el área de la sección transversal del canal. De esta ecuación se pretende obtener una expresión para la velocidad de onda:

$$u = \frac{A_1 V_1 - A_2 V_2}{A_1 - A_2} = \frac{q_1 - q_2}{A_1 - A_2} \quad \dots(ec. II. 2)$$

La velocidad de una onda monoclinal es entonces una función de la relación que hay entre el área del caudal del río.

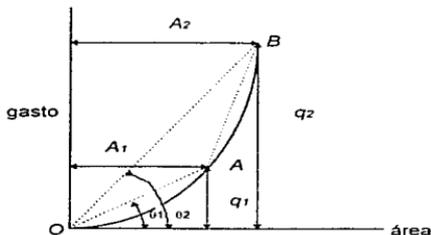


FIGURA II. 3 Relación área - descarga típica para un cauce y su influencia en la celeridad de la onda.

Dado que la velocidad aumenta generalmente con el nivel del agua, las curvas del área del caudal son generalmente cóncavas hacia arriba. Las pendientes de las secantes OA y OB representan las velocidades del agua en las secciones 1 y 2, respectivamente ($v_1 = q_1/A_1 = tg\theta_1$), mientras que la pendiente de la secante AB representa la velocidad de la onda. De lo anterior puede concluirse que: 1) la velocidad de onda es mayor que la velocidad del agua en la mayoría de los canales; 2) para un gasto pico dado, a onda con un gasto inicial mayor, viajará más rápido; y 3) para una onda de altura pequeña con respecto a la profundidad del canal:

$$u = \frac{dq}{dA} = \frac{dq}{B dy} \quad \dots(ec. II. 3)$$

donde B es el ancho del canal. La ecuación anterior se conoce como la *ley de Seddon* en memoria del hombre que demostró su aplicación para el río Mississippi. Los aspectos teóricos de la ley fueron deducidos independientemente por Kleitz (1958) y otros; pero Seddon nunca estuvo al tanto de estos trabajos

A partir de la Fórmula de Chézy para flujo en un canal muy ancho (suponiendo la profundidad igual al radio hidráulico)

$$v = C Y^{1/2} s^{1/2} \quad \text{ec(II. 4)}$$

$$y \quad q = Av = vBy = CBY^{3/2} s^{1/2} \quad \text{ec(II. 5)}$$

donde s es la pendiente de la superficie del agua. Derivando esta ecuación se obtiene:

$$\frac{dq}{dy} = \frac{3}{2} CBY^{1/2} s^{1/2} = \frac{3}{2} Bv \quad \text{ec(II. 6)}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación (II. 3) se obtiene:

$$u = \frac{3}{2} v \quad \text{ec(II. 7)}$$

La relación obtenida entre la velocidad del agua y la velocidad de onda depende desde luego de la forma del canal y de la fórmula utilizada. Los valores de la tabla II. 2 pueden ser utilizados como guías para estimar la velocidad de una onda.

Forma	Manning	Chézy
Triangular	1.33	1.25
Rectangular muy ancha	1.67	1.50
Parábola muy amplia	1.44	1.33

TABLA II. 2 Relación teórica entre la celeridad de una onda y la velocidad del agua para secciones transversales típicas.

En la figura II. 4 se muestra una segunda clase de ondas. Esta es una *onda abrupta*, y la figura muestra las condiciones un segundo después de que se ha abierto la compuerta instantáneamente. El volumen de agua que entra en el canal en ese mismo intervalo es $q_2 = A_2 v_2$ (área $acfd$). El aumento del volumen $abhg$ es:

$$q_2 - q_1 = u (A_2 - A_1) \quad \text{ec(II. 8)}$$

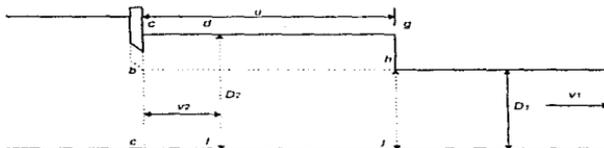


FIGURA II. 4 Esquema de definición para el análisis de una onda abrupta de transición.

sustituyendo $Av = q$ da:

$$v_2 = (A_1 v_1 + A_2 u - A_1 u) \frac{1}{A_2} \quad \text{..ec(II. 9)}$$

El volumen dfg ha sido acelerado de v_1 a v_2 por la fuerza F :

$$F = \frac{W}{g} (v_2 - v_1) = \frac{(u - v_2)(v_2 - v_1)A_2 w}{g} \quad \text{..ec(II. 10)}$$

donde W es el peso específico del agua. Puesto que F es también la diferencia de presiones sobre A_1 y A_2 :

$$F = w A_2 \bar{y}_2 - w A_1 \bar{y}_1 \quad \text{..ec(II. 11)}$$

donde y es la profundidad hasta el centro de gravedad de la sección. Igualando las ecuaciones (II. 10) y (II. 11), insertando v_2 de la ecuación (II. 9) y resolviendo para u se obtiene:

$$u = v_1 + \sqrt{g \frac{A_2 \bar{y}_2 - A_1 \bar{y}_1}{A_1 (1 - A_1 / A_2)}} \quad \text{..ec(II. 12)}$$

En un canal rectangular de ancho unitario se puede sustituir $D = A$ y $D/2 = y$. Por lo tanto:

$$u = v_1 + \sqrt{\frac{gD^2}{2D_1} (D_2 + D_1)} \quad \text{..ec(II. 13)}$$

y para ondas de pequeña altura respecto a la profundidad del canal, $D_1 = D_2 = D$:

$$u = v_1 \pm \sqrt{gD} \quad \text{..ec(II. 14)}$$

La ecuación (II. 12) es una ecuación aplicable a cualquier canal. La ecuación (II.13) se aplica solamente a canales rectangulares y la ecuación (II. 14) a ondas de pequeña amplitud en canales rectangulares. Las ondas abruptas de translación se presentan bajo la forma de ondas de marea en lagos y en ocasiones como ondas de avenida en ríos provenientes de tormentas de poca extensión y gran intensidad pluvial.

ONDAS DINÁMICAS Y CINEMÁTICAS. El examen de ecuaciones (II. 3) y (II. 14) muestra que las velocidades de las dos clases de onda consideradas son aparentemente independientes una de la otra. En el primer caso, la onda se puede propagar en cualquier dirección, mientras que en el segundo sólo puede viajar aguas abajo. Para aclarar las contradicciones evidentes es necesario considerar las ecuaciones básicas que gobiernan el movimiento de una onda. Suponiendo una pendiente constante en el fondo del canal S_b y suponiendo que no existe influjo lateral al mismo, se puede demostrar que:

$$q = AC \left[R (S_b - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial x}) \right]^{1/2} \quad \text{..ec.(II. 15)}$$

y

$$\frac{\partial q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad \text{..ec.(II. 16)}$$

donde C es el coeficiente de Chézy y R es el radio hidráulico. La ecuación (II. 16) es una forma de la ecuación de continuidad.

La deducción de la ecuación (II. 3) considera que la onda no se atenúa ni se dispersa pero que sí cambia de forma debido a la dependencia de v sobre q . La ecuación también implica que q es una función de y solamente que v se deduce directamente de la ecuación de continuidad. Lighthill y Witham han llamado estas ondas *cinemáticas*, mientras que aquellas que dependen también de la influencia de la inercia se llaman *dinámicas*. El movimiento cinemático requiere que los tres términos de pendiente diferentes de S_b en la ecuación (II. 15) sean despreciables, o sea, que la línea de la energía sea paralela al fondo del canal. Esta condición satisface muchos canales naturales con pendiente de 0.002 o más.

En general el término ∂y será pequeño y los demás términos serán despreciables. Con una velocidad de 3m/s(10ft/s) y una tasa de aumento de la elevación de 1.5 m/hr (5 ft/hr), $\partial y = 1/7200$. De esta manera, solamente cuando los canales son muy planos o cuando existen tasas de cambio de caudal muy grandes (como en el caso de la onda producida por la falla de un embalse) se violan los principios de propagación cinemática de las ondas.

ONDAS EN CANALES NATURALES. Las ecuaciones desarrolladas en la sección II. 1 han sido comprobadas por medio de experimentos controlados en canales de laboratorio con secciones transversales uniformes. También se han efectuado verificaciones razonables en canales naturales donde las contribuciones localizadas de gasto son despreciables, como en el caso del río Mississippi demostrado por Seddon y en el caso de propagación de ondas en diques de TVA, demostrado por Wilkinson. La ecuación (II. 14) da buenas estimaciones de la velocidad de ondas de impulso en canales con aguas quietas.

El tratamiento matemático simple de las ondas de avenida necesariamente está limitado a canales uniformes con secciones transversales relativamente uniformes. Los hidrólogos deben tratar casos de canales no uniformes con secciones transversales complejas, pendiente no uniforme y rugosidad variable. Las fórmulas de la sección II. 1 se

aplican a ondas generadas en un punto de ún canal, pero la mayoría de las ondas de avenida se forman por influjo no uniforme a lo largo de los canales de red hidrológica. Por estas razones, las ondas naturales de avenida son mucho más complicadas que los casos relativamente simples que se presentan a análisis matemático y verificación experimental

El tratamiento teórico es útil en estudios de ondas abruptas en canales, ondas de impulso en agua quieta (incluyendo ondas de marea en lagos y estuarios), y en estudios de ondas provenientes de embalses en una presa. Hasta hace muy poco, el movimiento de las ondas en canales naturales había sido tratado exclusivamente por procedimientos *hidrológicos de tránsito*. Tales procedimientos resuelven la ecuación de continuidad, o ecuación de almacenamiento, para un extenso canal, generalmente limitado por dos estaciones de conducido a una renovación del interés en métodos *hidráulicos de tránsito*, que están basados directamente en las características hidráulicas del canal y pueden tener en cuenta también efectos dinámicos. Un tratamiento completo de éstos métodos está fuera del alcance de los intereses de esta tesis.

Las ondas naturales de avenida son, generalmente, intermedias entre la traslación y el almacenamiento puro que ocurre en embalses amplios y en lagos. La figura II. 5 ilustra las grandes modificaciones que pueden ocurrir cuando una onda de avenida se propaga a través de un embalse en el cual la descarga está en función de la cantidad de agua almacenada. Las fuerzas de cantidad de movimiento predominan en ondas de traslación pura, y esas ondas tienen bases de tiempo relativamente cortas comparadas con las ondas del sistema en el cual se mueven. La mayoría de las ondas naturales de avenida se mueven bajo el control de la fricción y tienen bases en el tiempo que exceden considerablemente las dimensiones del cauce.

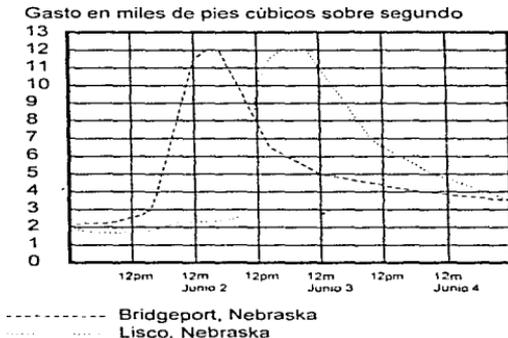
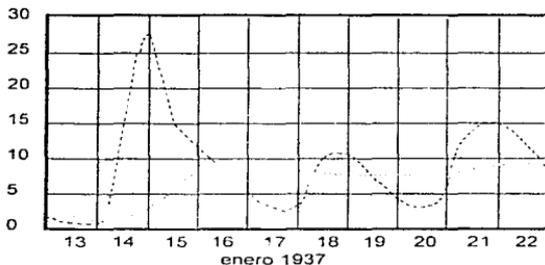


FIGURA II. 5 Ejemplo de una onda de traslación, río North Platte cerca de Bridgeport y Lisco Nebraska, Estados Unidos.



----- Pleasant Hill, Ohio
 Englewood, Ohio

FIGURA II. 6 Reducción del gasto debido al almacenamiento en el embalse amortiguador de Englewood, río Siltwater, Ohio, Estados Unidos

LA ECUACIÓN DE ALMACENAMIENTO. La ecuación de continuidad puede expresarse en la ecuación (II. 16) o también como:

$$I - O = \frac{ds}{dt} \quad \text{..ec(II. 17)}$$

$$I - O = \frac{\Delta s}{t} \quad \text{..ec(II. 18)}$$

donde I es el gasto afluente, O es el gasto que sale y S es el almacenamiento, todo lo anterior para un tramo específico de un río. Para dar una forma más conveniente para el tránsito hidrológico de avenidas, generalmente se supone que el promedio de los flujos al comienzo y al final de un intervalo pequeño de tiempo t (intervalo de tránsito) es igual al

flujo promedio durante ese periodo. Usando los subíndices 1 y 2 para indicar las condiciones al principio y al final del intervalo se puede escribir:

$$\frac{I_1 + I_2}{2} t - \frac{O_1 - O_2}{2} t = S_2 - S_1 \quad \text{ec(II. 19)}$$

La mayoría de los métodos hidrológicos de tránsito de avenidas están basados en la ecuación (II. 19). Se supone inicialmente que I_1 , I_2 , O_1 y S_1 se conocen y se trata de encontrar O_2 y S_2 . Puesto que hay dos incógnitas, es necesario encontrar una segunda relación entre almacenamiento y flujo para poder hallar una solución. Los principales obstáculos en tránsito hidrológico están en la determinación de esta última relación.

La suposición de que $(I_1 + I_2)/2 = I$ implica que el hidrograma es una línea recta durante el periodo t . Por esto, el factor más importante en la selección del periodo t se hace demasiado pequeño para garantizar que la suposición sea cierta. El periodo de tránsito nunca debe ser mayor que el tiempo de viaje de la onda a través del tramo del río pues la onda podría atravesar completamente el tramo durante el periodo t . Si por otra parte el periodo t se hace demasiado pequeño, el trabajo requerido aumenta pues se necesitan las mismas operaciones para cada periodo. En general, aquellos valores de t comprendidos entre un medio y un tercio del tiempo de viaje trabajan bastante bien. Dado que el proceso de tránsito hidrológico se basa en la ecuación de continuidad, el volumen calculado de salida de una avenida debe ser igual al volumen de entrada ajustado por cualquier cambio que ocurra en el almacenamiento. Si estos volúmenes no concuerdan, quiere decir que existe un error grande en el cálculo. Los pequeños errores de cálculo generalmente se compensan rápidamente. Si se sobrestima la salida en un intervalo, el almacenamiento al final de ese intervalo será demasiado pequeño y la salida en el intervalo será algo menor. Estos errores rara vez producen inestabilidad en la solución.

DETERMINACIÓN DE ALMACENAMIENTO. Antes de poder establecer una relación entre almacenamiento y flujo, es necesario medir el volumen de agua que hay en el río para varios niveles. La manera más obvia de hacer esta operación es calcular los volúmenes de acuerdo con mediciones de la sección transversal utilizando la fórmula de los prismas. Por lo general se considera que la superficie del agua está a nivel entre las secciones transversales. El almacenamiento total del tramo será igual a la suma de los almacenamientos parciales entre cada dos secciones transversales. Para la suma, la elevación en cada sub-tramo es igual a la elevación indicada en la curva de remanso en el punto medio del sub-tramo (fig. II. 7). Este método requiere de mediciones extensas para obtener secciones transversales adecuadas y muchos cálculos de perfiles de la superficie libre del agua para varias condiciones de flujo no permanente para obtener una descripción del almacenamiento en todo el rango de condiciones esperado. El método es costoso y difícil de llevar a cabo, y sólo se usa cuando no hay otra alternativa. Por ejemplo, este método se utilizaría cuando se necesite calcular el almacenamiento en un tramo en el cual se van a realizar alteraciones del cauce, en cuyo caso las condiciones después de la construcción serían radicalmente diferentes en las condiciones actuales.

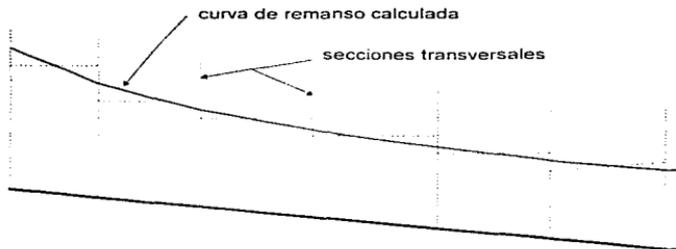


FIGURA II 7 CÁLCULO DEL ALMACENAMIENTO BASADO EN LAS CONDICIONES TRANSVERSALES DEL CAUCE

Las curvas de almacenamiento - vs - elevación para embalses, se determinan midiendo por medio de un planimetro, las áreas entre los contornos sucesivos de un relieve en un mapa topográfico. Estas áreas, multiplicadas por los incrementos de elevación, producen incrementos de volumen entre los puntos medios de dos intervalos por encima y por debajo del área medida. Se supone que el nivel de agua es siempre horizontal, lo cual se cumple en la mayoría de los casos. En embalses largos y de poca profundidad, el nivel de agua puede no ser muy horizontal durante gastos altos (fig. II. 8). En estos casos es preciso efectuar mediciones de la sección transversal y calcular los perfiles del flujo como se explicó con anterioridad.

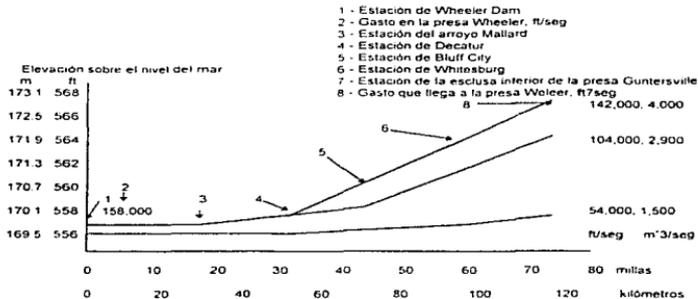


FIGURA II 8 Perfiles de la superficie libre en el embalse Wheeler del río Tennessee, Estados Unidos (Datos de la TVA)

El método más común para determinar el almacenamiento en un tramo de un río consiste en utilizar las ecuaciones (II 18) y (II 19) con caudales observados. La figura II 9 muestra los hidrogramas de entrada y de salida para un tramo de un río. Cuando las entradas exceden a las salidas, ΔS es positivo, cuando las salidas exceden a las entradas, ΔS es negativo. Dado que el tránsito de ondas requiere sólo el conocimiento de ΔS , el valor real de S no es necesario y el punto de almacenamiento cero se puede escoger arbitrariamente. En cualquier tiempo, el almacenamiento será la suma de los incrementos positivos y negativos de ΔS a partir del punto cero. Los cálculos se ilustran en la figura

Uno de los inconvenientes más problemáticos del tránsito de avenidas es el *influjo local* que entra en el tramo entre las dos estaciones que lo delimitan. Si el *influjo local* se presenta cerca de las estaciones de entrada, generalmente se suma directamente al hidrograma de entrada. En el sitio de una desembocadura importante, las estaciones de entrada (para las cuales se añade el flujo) deben estar más arriba del punto final del efecto de las curvas de remanso. Si el *influjo local* ocurre más cerca de la estación final del tramo, se puede sustraer del hidrograma de salida antes de calcular el almacenamiento. En este caso, el flujo del cauce principal se propaga a través del tramo y el *influjo local* se añade después de terminado el tránsito. Entre dos casos extremos se encuentran muchas posibilidades de combinación de porcentajes del caudal principal y el porcentaje del caudal localizado antes del tránsito, y de añadir el resto después del mismo al hidrograma de salida. Si el *influjo local* es relativamente pequeño en comparación con el caudal principal, cualquier sistema, aplicado en forma conveniente, debería dar buenos resultados. Si el *influjo local* es grande, debe considerarse la posibilidad de reducir el tamaño del tramo.

HORA	I	O	ΔS	S
3/6 p.m.	560	700	-140	-
3/12 p.m.	660	660	0	-
4/6 a.m.	2500	1020	1480	0
4/12 a.m.	5500	1950	3650	1480
4/6 p.m.	5950	2650	3300	5130
4/12 p.m.	4200	3350	850	8430
5/6 a.m.	2950	3700	-750	9280
5/12 m.	2100	3680	-1580	8530
5/6 p.m.	1470	3100	-1630	6950
5/12 p.m.	1000	2450	-1450	5320
6/6 a.m.	740	2000	-1260	3870
6/12 m.	600	1650	-1050	2610
6/6 p.m.	530	1300	-770	1560
6/12 p.m.				790

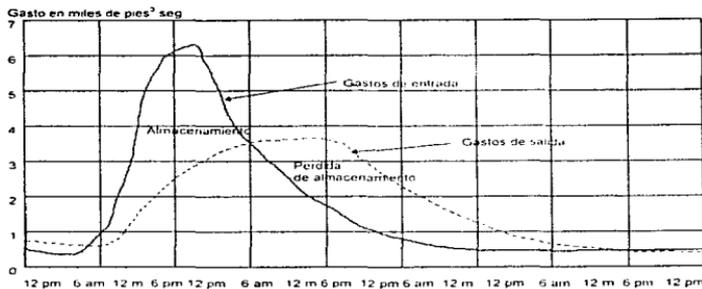


FIGURA II 9 CAI GULO DEL ALMACENAMIENTO EN EL CANAL A PARTIR DE LOS HIDROGRAMAS DE ENTRADA Y SALIDA

El volumen total de influjo local no medido puede determinarse substrayendo las salidas medidas de las entradas medidas para un periodo que comience y termine con el mínimo estado de flujo bajo, o sea, para $\Delta S = 0$. Generalmente se considera que la distribución temporal del flujo local no medido coincide con lo gastos observados en un tributario pequeño de tamaño y carácter similar a los cauces típicos del área que no tiene registros. Este procedimiento concentra todos los errores de medición de gasto en el influjo local no medido, y es posible que los gastos resultantes no sean del todo razonables. Si la infiltración a partir del tramo del río es alta, el influjo local no medido puede ser negativo.

TRANSITO DE AVENIDAS A TRAVÉS DE EMBALSES. Un embalse, en el cual el gasto es una función de las elevaciones del nivel de agua ofrece el caso más simple para el tránsito de avenidas, además es el que nos interesa para este tema. Un embalse puede tener en general compuertas controladas y/o un vertedor libre. Los embalses con compuertas y vertedores controlados pueden analizarse como los primeros si se supone que los conductores están abiertos en una posición fija. Los datos disponibles para el análisis del embalse son las curvas de almacenamiento - vs - elevación y de elevación - vs - descarga (figura II. 10) La ecuación (II. 19) puede transformarse (II. 16) en:

$$I_1 + I_2 + \left(\frac{2S_1}{t} - O_1 \right) = \frac{2S_2}{t} + O_2 \quad \dots \text{ec(II. 20)}$$

La solución de la ecuación (II. 20) requiere de una curva de tránsito que indique el valor de $2S_1t + O$ contra valores de O . (figura II. 10). Todos los términos del lado izquierdo de la ecuación son conocidos y el valor de $2S_2t + O_2$ puede ser calculado; el valor de O_2 se obtiene entonces de la curva de tránsito. Los cálculos se repiten así para otros intervalos. La tabla (II. 3) ilustra una solución típica. Debe señalarse que los valores de $2S_1t - O$ pueden calcularse fácilmente como $(2S_1t + O) - 2O$.

FECHA	HORA	i pie ³ /seg	$2S_1t + O$ pie ³ /seg	$2S_1t - O$ pie ³ /seg	O pie ³ /seg
1	Mediodía	20	470	500	15
	Medianoche	50	508	540	16
2	Mediodía	100	578	658	40
	Medianoche	120	632	798	83
3	Mediodía	80	642	832	95
	Medianoche	40	620	762	71

Los datos disponibles al comienzo del tránsito se anotan en tipo más oscuro

TABLA II 3 TRANSITO PARA LA CURVA $2S_1t + O$ DE LA FIGURA II 10

El tránsito de una avenida a través de un embalse con salida controlada depende del método de operación. Una ecuación general puede obtenerse modificando la ecuación (II. 19) a:

$$\frac{I_1 + I_2}{2} t - \frac{O_1 + O_2}{2} t - \hat{O}_R t = S_2 - S_1 \quad \text{..ec(II. 21)}$$

donde O es la salida no controlada, y O_R es la salida controlada. Si O es cero, la ecuación (II. 21) pasa a ser:

$$i_1 - \hat{o}_R t + S_1 = S_2 \quad \text{..ec(II. 22)}$$

que puede resolverse fácilmente para S_2 y la elevación del embalse. Si O no es cero, la ecuación de tránsito se transforma en:

$$I_1 + I_2 - 2\hat{O}_R + \left(\frac{\dots}{t} - O_1\right) = \left(\frac{\dots}{t} + O_2\right) \quad \text{..ec(II. 23)}$$

La solución de la ecuación (II. 23) es idéntica a la de la ecuación (II. 20) excepto por la inclusión de O_R .

Si las compuertas se fijan en una sola posición de manera que la descarga sea una función de la altura del nivel del agua, la solución requiere de una familia de curvas $2S^2 + O$ para diferentes aberturas de compuertas. El método de tránsito es aún el mismo de la ecuación (II 20) excepto que en cada ocasión se debe utilizar la curva de la apertura correspondiente de la compuerta.

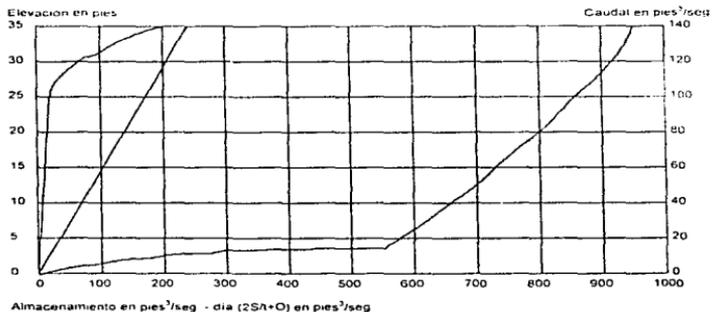


FIGURA II 10 CURVAS DE TRÁNSITO PARA UN EMBALSE TÍPICO.

II. 4. 4. TIPOS DE CORTINA Comenzaremos diciendo que la cortina es quizá la obra más importante de un proyecto hidroeléctrico, pues la falla de éste elemento ocasionaría la interrupción del funcionamiento de todos los servicios que la presa pudiera proporcionar, además de esto podría causar graves daños y pérdidas de vidas a poblados que pudieran existir aguas abajo del proyecto, todo esto sin considerar las cuantiosas pérdidas económicas que provocaría. Por esta razón siempre se debe tener un especial cuidado para escoger el tipo de cortina más apropiado para las condiciones del proyecto. Sin confundir los terminos "PRESA" y "CORTINA" pues el primero es para referirse a un proyecto hidroeléctrico y el segundo sólo se refiere al obstáculo que provoca el remanso se hará a continuación una clasificación de presas y se aprovecha para indicar tipos de cortinas.

CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE PRESAS.

Las presas se pueden clasificar en un número de categorías diferentes, que dependen del objeto de la clasificación, existen 3 amplias clasificaciones de acuerdo con:

El uso, el proyecto hidráulico, o los materiales que forman la estructura.

Clasificación referente al uso.

De acuerdo a la función más general que tienen, se clasifican en:

PRESAS DE ALMACENAMIENTO.

Se construyen para embalsar el agua en los periodos de lluvia, para utilizarla en tiempo de estiaje.

Estos periodos pueden ser estacionales, anuales o más largos.

Las presas de almacenamiento se pueden clasificar de acuerdo con el objeto del almacenamiento:

- Para abastecimiento de agua.
- Para recreo.
- Para la cría de animales.
- Para la generación de energía eléctrica.
- Irrigación, etc.

El objeto u objetivos por los que se va a utilizar el almacenamiento influyen en el proyecto de la estructura, en la magnitud de las variaciones del nivel que se presentan en el vaso y el volumen de filtraciones que pueden permitirse.

PRESAS DE DERIVACIÓN.

Se construyen para proporcionar la carga necesaria para desviar el agua hacia zanjas, canales u otros sistemas de conducción al lugar en que se van a usar. Se utilizan en los sistemas de riego, para la derivación de una corriente natural hacia un vaso de almacenamiento fuera del cauce natural de la corriente, para usos municipales y/o industriales.

PRESAS REGULADORAS.

Se construyen para retardar el escurrimiento de las avenidas y disminuir el efecto de las ocasionales. Las presas reguladoras se dividen en dos tipos:

- En uno de ellos, el agua se almacena temporalmente, y se deja salir, por una obra de toma con un gasto que no exceda de la capacidad del cauce aguas abajo.
- En el otro tipo, el agua se almacena tanto tiempo como sea posible y se deja infiltrar en las laderas del valle o por los estratos de grava de la cimentación.

A este último se le llama de distribución o dique, porque su principal objeto es recargar los acuíferos.

Las presas reguladoras también se construyen para detener los sedimentos. A menudo a estas presas se les llama presas para arrastre.

TIPOS DE CORTINA:

La cortina es la estructura de la presa construida en la boquilla, la cual, al interrumpir la corriente, eleva el tirante del agua provocando el almacenamiento de la misma.

Dependiendo de los materiales usados en su construcción, así como el comportamiento de la cortina, éstas pueden clasificarse en dos grandes grupos: **FLEXIBLES Y RÍGIDAS**



RÍGIDAS

- Arco Simple
- Arco Gravedad
- Gravedad Y Eje Recto
- Diques Huecos
- Tipo Ambursen
- Arco Múltiples
- Con Machones De Cabeza

Pueden tenerse en algunos casos cortinas con características combinadas, es decir, construidas en un tramo por un tipo y en otro tramo por otro tipo, conservando cada tramo las características propias del tipo a que pertenecen.

A continuación se dará una breve descripción de cada tipo de cortina mencionado anteriormente

CORTINAS DE ENROCAMIENTO: Al igual que todas las cortinas flexibles, este tipo tiene una sección trapecial con taludes tendidos, trabajando el enrocamiento como un elemento estabilizador únicamente, teniendo la necesidad de tener un elemento impermeable que puede ser una losa apoyada en el paramento aguas arriba, o bien, un corazón flexible arcilloso. En este último caso es necesario colocar un filtro entre el corazón y el enrocamiento para evitar que el agua arrastre el material del corazón. El talud usado en estas cortinas es aproximadamente 1.4:1, siendo éste el que más se acerca al talud natural de la roca. En algunos casos se emplea como elemento impermeable láminas de fierro apoyadas en una capa de concreto o situadas entre dos capas de material. Si el recubrimiento es de concreto, éste estará constituido por losas unidas mediante juntas elásticas, para absorber en cierta forma, los asentamientos debido al acomodo del macizo de roca; esta losa continuará hasta el elemento impermeable de la cimentación mediante un dentellón del mismo material.

CORTINAS DE TIERRA. Al igual que las anteriores, estas cortinas están formadas por materiales flexibles, entendiéndose por materiales flexibles, aquellos en que los movimientos de unas partículas con relación a otras, pueden ser bastante fuertes, produciéndose dislocamientos entre ellas. La falta de cohesión de una partículas con respecto a otras, da origen a perfiles mucho más tendidos que en los usados en cortinas de materiales rígidos. Los requisitos que debe satisfacer una cortina de tierra serán principalmente los siguientes:

- a) Evitar que el agua rebase la corona de la cortina, dando una amplia y suficiente capacidad al vertedor y elevando la cortina ampliando el bordo libre. Lo anterior para evitar que el agua brinque la cortina, pues el material sería arrastrado, causando graves daños a la cortina.
- b) Mediante dispositivos espaciales, bajar lo más que se pueda la línea de saturación superior.
- c) Que el gradiente del agua que logra pasar a través de la cortina, sea mínimo, tal que no pueda transportar partículas de material.

- d) El talud del paramento será tal que impida un súbito deslizamiento en caso de tener un vaciado rápido del vaso.
- e) Aguas abajo del talud, debe tenerse una correcta estabilidad estando el material saturado hasta la línea superior de flujo
- f) Ambos paramentos deben estar debidamente protegidos para evitar daños en el material impermeable debido al oleaje y a la acción de las lluvias
- g) Siempre que sea posible, evitar la localización de la obra de toma en la cortina.

CORTINA DE ARCO. La forma de distribución del material, permite la transmisión del empuje del agua y de otros esfuerzos, tales como el de temperatura, en planos horizontales hacia las laderas de la boquilla.

Para su construcción, generalmente se emplea el concreto, que muchas veces es necesario reforzarlo. El peso propio y la sub-presión, no se consideran en el análisis de estabilidad. Para poder emplear el arco, es necesario contar con las siguientes condiciones topográficas y geológicas:

- a) La boquilla debe ser angosta para no tener claros grandes y evitar así aumentar el espesor del arco.
- b) Las laderas de la boquilla deben presentar roca sana y bastante resistente para soportar los grandes esfuerzos, que son transmitidos por los arranques de la cortina a las laderas.

Cuando las condiciones Geológicas y Topográficas permiten emplear el arco, se obtiene una alta economía debido al poco volumen del material empleado; también se tiene una gran seguridad ya que se ha visto que de las presas así construidas, éstas se comportan más de acuerdo a las condiciones de cálculo.

CORTINAS DE ARCO GRAVEDAD (MIXTAS). Corresponden a este tipo las cortinas que tienen características de uno y otro tipo, constituyendo así las cortinas mixtas, donde hay elementos estructurales que transmiten los esfuerzos a planos horizontales y elementos que transmiten los mismos a planos verticales. En general, no se puede hacer una distinción física entre ellos, sino que se puede considerar dividido en cuerpo y estructura en anillos horizontales y en tajadas verticales. Los anillos horizontales toman parte del empuje del agua y lo transmiten horizontalmente a las laderas. Las tajadas verticales toman el resto del esfuerzo y lo transmiten por medio de planos verticales a la cimentación.

Las proporciones de esfuerzo que se transmiten tanto horizontalmente como verticalmente, dependerán del grado de rigidez de unos elementos, así, mientras mayor sea la esbeltez de una presa de arco gravedad, mayor será la proporción del esfuerzo que se trasmite por la acción del arco.

CORTINAS DE GRAVEDAD. En este tipo de cortinas, las cargas exteriores son soportadas, casi en su totalidad, por el peso propio de la estructura, los esfuerzos se

transmiten en planos verticales hacia la cimentación. estas cortinas tiene una acción uniforme y los materiales de que pueden constituirse son: mampostería con mortero, concreto simple o concreto ciclópeo. Se consideran dentro de este tipo, las cortinas de gravedad huecas, tales como los diques huecos y las presas de gravedad sólidas, las que deberán proyectarse para que satisfagan todos los requisitos de estabilidad siguientes:

- 1.- La resultante de todas las fuerzas no deberá salirse de la base, para evitar el volteamiento.
- 2.- Para cualquier sección horizontal, la resultante de todas las fuerzas, deberá caer dentro del tercio medio de dicha sección para que no existan tensiones en el material aguas arriba.
- 3.- La relación del empuje del agua al peso de la cortina, debe ser menor que el coeficiente de fricción entre el material de ésta y la cimentación, para evitar deslizamientos en planos horizontales.
- 4.- En cualquier punto de la cortina o de la cimentación, el esfuerzo no debe pasar de cierto límite admitido para el material, para impedir que la presa falle por aplastamiento.
- 5.- Los esfuerzos que deben considerarse es este tipo de cortinas son los siguientes:

- a) Empuje del agua
- b) Peso de la estructura
- c) Sub-presión
- d) Empuje hidrostático adicional (sismo)
- e) Fuerza sísmica de inercia
- f) Azolve
- g) Oleaje

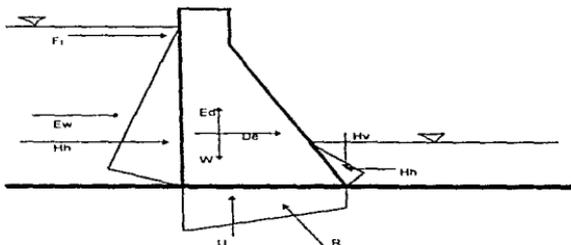


FIGURA II 11 FUERZAS ACTUANTES EN UNA CORTINA A GRAVEDAD

- W = Peso Propio
- H_h = Componentes horizontales de la presión hidrostática.
- U = Sub-presión
- F_i = Presión del hielo
- E_w = Incremento de la presión hidrostática causada por el sismo
- E_a = Fuerza de inercia producida por el sismo sobre la cortina
- R = Equilibrante, que es igual a la fuerza efectiva de la cimentación sobre la base de la corona

La sub-presión actúa en dirección vertical ascendente levantando a la cortina. Respecto al movimiento sísmico, éste producirá movimientos en el agua y la cortina, debido a la fluidez del agua y a la rigidez de la cortina. Estos movimientos no son simultáneos, habiendo entonces empuje adicional del agua sobre la cortina que se llama fuerza sísmica

DIQUES HUECOS. La sección de estas cortinas no es continua, sino que está constituida por machones que transmiten los esfuerzos a la cimentación, sirviendo de apoyo el elemento impermeable de la cortina, que puede ser una losa continua, también puede ser una sucesión de arcos cuyos estratos se apoyan en machones hacia los cuales se transmiten coecos. El elemento impermeable también puede estar constituido por ensanchamiento de los mismos machones en el paramento de aguas arriba, uniéndose esta parte con su correspondiente del machón contiguo. Para áreas de cimentación más reducidas que en los casos anteriores, se requieren aun condiciones mejores de cimentación. Comparados con el tipo de presas de gravedad, se considera que suprime aproximadamente el 60% del volumen del material usado en ésta. La sub-presión baja considerablemente en virtud de que el agua puede salir libremente después de la pantalla. Para estos casos, la topografía debe ser tal que permite el espaciamiento uniforme de los machones, los cuales deben ser de preferencia iguales en altura. En general las fatigas son más elevadas que en las del tipo anterior.

TIPO AMBURSEN. Estas cortinas se hacen de pantalla plana y contrafuertes. Se les llama Ambursen en honor al apellido de su inventor, Nils Ambursen. Los contrafuertes se unen a las placas de la pantalla por medio de juntas de dilatación. Por lo que se refiere a la cimentación de estas cortinas, podemos decir que abarca una gran cantidad de diversos materiales, variando desde la arena fina, la grava, arena gruesa, calizas y rocas macizas

TIPO ARCO MÚLTIPLE. Están formadas por una serie de arcos que transmiten las cargas del agua a los respectivos contrafuertes. Es un tipo rígido de cortina de contrafuertes, ya que la pantalla está unida monolíticamente.

CON MACHONES DE CABEZA. Estos pueden ser de cabeza redonda, cabeza de diamante, etc

SELECCIÓN DEL TIPO DE CORTINA:

Para poder seleccionar el tipo de cortina adecuado es necesario hacer un cuidadoso examen de las condiciones físicas existentes en la zona y en la boquilla, ya que solamente en esta forma se llega a diseñar un tipo aceptable desde los puntos de vista de economía, seguridad y óptimo aprovechamiento.

Respecto a las condiciones físicas mencionadas anteriormente, estas se refieren predominantemente a la clase y calidad de los materiales disponibles para su construcción y el tipo de materiales que tiene la cimentación. Por otra parte intervienen muy importantemente las condiciones topográficas de la boquilla, las condiciones hidráulicas durante el periodo de construcción y el funcionamiento de la cortina, las condiciones de acceso, las condiciones de tránsito sobre la corona y finalmente las condiciones climatológicas del lugar.

Para fines de proyecto, es recomendable establecer comparaciones con aquellos presas ya construidas en situaciones similares, siempre y cuando existan.

Se consideran materiales disponibles, aquellos que se pueden trasladar al lugar de la construcción y que comparados unos con otros, se pueden elegir los que den por resultado la construcción más económica de la cortina. Muchas de las veces existen materiales que se pueden emplear y que a veces se encuentran en el lugar de la construcción, o en las inmediaciones de ésta, tales como la roca, la grava y la tierra. Otros materiales en la mayoría de los casos, es necesario transportarlos desde distancias más o menos considerables, como sucede con el cemento y el fierro.

Es muy importante tener cuidado en la localización y determinación de la capacidad y calidad de los bancos de material disponible en la zona, así como en la investigación de la existencia de mercados en cuanto a materiales de fábrica, teniendo en cuenta primordialmente aquellos que sirvan para la elección de nuestra cortina. La rapidez y la facilidad de los medios de acceso desde los bancos y mercados de material hasta el sitio de la presa, ya que una vez cumplidas favorablemente estas condiciones, podremos asegurar que se tendrá el mejor rendimiento del equipo y consecuentemente habrá economía y rapidez en la construcción.

Por lo que se refiere al aspecto geológico, las condiciones de cimentación de una boquilla, necesariamente tienen relación muy importante con el tipo de cortina que se elija. En general se puede decir excluyendo otros factores, que: Un tipo flexible de cortina debe ser construido sobre una cimentación flexible; y un tipo rígido, sobre una cimentación rígida. Este principio conduce en la práctica a construir presas de tierra y de enrocamiento, sobre cimentaciones de tierra, arena o grava, y a la construcción de presas de mampostería o de concreto, sobre roca firme.

La resistencia, el grado de permeabilidad, las deformaciones, el grado de erosión del material de cimentación de la boquilla, son factores que intervienen tanto en la elección de la boquilla como en el tipo de cortina, requiriéndose un juicio muy cuidadoso y una amplia experiencia.

Por lo general en algunas ocasiones, las condiciones hidráulicas en las que se va a desarrollar la construcción de la cortina, intervienen en la elección de sus materiales constitutivos, así como también las condiciones hidráulicas necesarias durante su funcionamiento.

Otro factor a considerar en la elección de la cortina y el ancho de su corona, es el que se refiere a la utilización de dicha corona como medio de salvar el cauce del río y permitir el tránsito de vehículos.

En cuanto a las condiciones climatológicas más importantes que se deben tomar en cuenta, es conocer la existencia o no de fuertes cambios de temperatura, pues en caso de tener volúmenes de concreto, éstos se verían afectados por dichos cambios. También debe tenerse en cuenta la frecuencia e intensidad de las precipitaciones en las diferentes épocas del año, para poder programar los procesos constructivos

II.5. OBRA DE DESVÍO

II.5.1 CIERRE DE CAUCES. Una vez que se ha determinado la altura de las ataguías tanto aguas arriba como aguas abajo, la cantidad de material que se debe utilizar y se ha definido la localización de las ataguías, se puede pensar en el método que se debe usar para comenzar a levantar el obstáculo que detendrá el flujo de agua para crear el almacenamiento hasta que el agua comience a circular por la obra de desvío. Por lo mencionado anteriormente, cabe resaltar que es necesario tener lista la obra de desvío, en caso de ser necesaria, pues las ataguías en forma de "C" no necesitan obra de desvío, pues el cauce natural del río sigue trabajando pero con una sección mayor, naturalmente el tirante se eleva al conservar el gasto y disminuir el ancho del canal natural. Existen básicamente dos métodos de cierre de cauces, el frontal y el lateral. Cada uno de ellos debe usarse según las características del lugar.

CIERRE FRONTAL. Este método consiste en la construcción de un puente que cruce el río de lado a lado, sobre el sitio donde quedarán las ataguías. Anticipándonos un poco al siguiente apartado, diremos que existen varias formas de ataguías, unas que cierran totalmente el río y otras que sólo disminuyen la sección para poder trabajar en la mitad del río, mientras la otra mitad permite el flujo de agua sin crear ningún almacenamiento. El cierre frontal se usa cuando se quiere obstruir por completo el paso del agua. Consiste en construir el puente sobre el río y con ayuda de camiones de volteo empezar a vaciar material al cauce desde el puente, el material debe tener un peso suficiente para no ser arrastrado por la corriente.

Este método se puede usar cuando el río es estrecho, pero si el río es muy ancho conviene la utilización del método que se describe brevemente a continuación.

CIERRE LATERAL. Este método se puede utilizar para construir ataguías en forma de "C", que cierran parcialmente el cauce del río, pero también se puede utilizar para cerrar totalmente el cauce del río, se pueden tener uno o dos frentes de trabajo, que pueden estar en uno o ambos lados del río, por ejemplo: si se desea hacer una ataguía en forma de "C", se tendrían dos frentes de trabajo del mismo lado del río.

El método consiste en llevar el material que formará parte de la ataguía y depositarlo en una margen del río, luego, con la ayuda de tractores empujadores, se acarrea el material hacia el cauce del río, ganándole terreno y disminuyendo poco a poco la sección del río. No es necesario compactar el material que se está alojando en las laderas, pues con el peso de la maquinaria que circula constantemente sobre éste, obtiene un grado de compacidad suficiente para que el material no sea arrastrado por la corriente y tampoco sufra deformaciones excesivas una vez terminado el trabajo.

II.5.2. ATAGUÍAS AGUAS ARRIBA Y AGUAS ABAJO Las ataguías son el primer obstáculo que se le pone al río para desviar su cauce en el tramo donde se construirá la cortina dejando un espacio seco para trabajar. Se necesitan por lo regular dos ataguías, la primera es aguas arriba del río y por medio de esta se logra desviar el cauce del río por una obra construida para este fin antes de iniciar el cierre del cauce; así, la ataguía obliga a que el nivel del agua comience a subir hasta que ocurre por la obra de desvío. Esta primer ataguía se diseña con un periodo de retorno de 50 años como mínimo y se transita al igual que un vaso de almacenamiento dejándole también un bordo libre. La segunda ataguía se construye aguas abajo de la primera y aguas arriba de la salida de agua de la obra de desvío, esta ataguía tiene como objetivo evitar el regreso del agua sobre el cauce del río hacia la primer ataguía para lograr un terreno seco para poder construir la cimentación de la cortina. Esta ataguía es más pequeña que la ataguía aguas arriba pues el agua no tiende a almacenarse en este punto, sino que puede seguir su camino por el cauce del río. Una vez terminadas las ataguías el agua que queda en medio de ellas es extraída mediante bombeo. Las ataguías son el producto terminado del cierre de cauces. Se puede decir que el cierre de cauces es en realidad una construcción de las ataguías. Existen dos tipos de ataguías, estas pueden o no formar parte del cuerpo de la cortina dependiendo del tipo de cortina del que se trate y del lugar donde se construyan las ataguías.

Ataguías en forma de "C" o "U".

Estas ataguías se construyen cuando la sección transversal del río es muy ancha y el río puede conducir todo su gasto por una parte del cauce sin desbordarse. Estas ataguías forman parte del cuerpo de la cortina. Como su nombre lo define, tienen forma de "C" ó "U" y tienen la particularidad de que la misma ataguía está aguas arriba y aguas abajo del lugar de la cortina, pues sólo cierran parcialmente el cauce del río. Se puede tener una o dos ataguías, dependiendo del ancho del río (ver figuras II.12 y II.13).

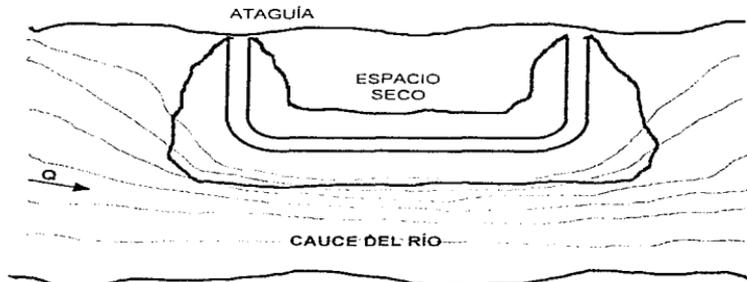


FIGURA II.12 ATAGUÍA EN FORMA DE "C" EN UNA SOLA MARGEN DEL RÍO

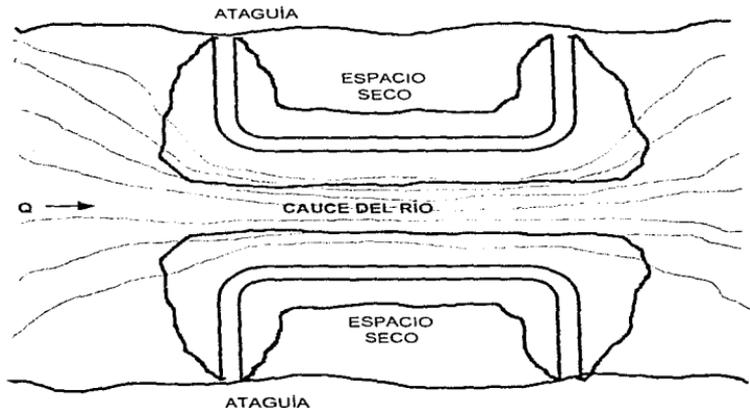


FIGURA II.13 ATAGUÍAS EN AMBAS MÁRGENES DEL RÍO

ATAGUÍAS EN FORMA DE "I".

Estas ataguías se utilizan cuando el río es estrecho y se necesita construir una obra de desvío, que puede ser un túnel o un canal en las laderas del río. en este caso, siempre se necesita de dos ataguías, una aguas arriba y una aguas abajo del río y es necesario tener lista la obra de desvío antes de empezar a construir las ataguías. Se puede usar para la construcción de este tipo de ataguías ambos métodos de cierre de cauces, contrario al anterior en el que sólo se puede usar el cierre lateral. El ataguía cierra completamente el paso del agua, por lo que debe atravesar completamente el cauce del río para conseguir este objetivo. (Ver figura II.14.)

Una vez terminadas ambas ataguías el agua comienza a almacenarse y por consiguiente a subir de nivel, hasta que alcanza el nivel de la obra de desvío y comienza a escurrir por esta para más adelante regresar a su cauce natural. En algunos casos, el

agua regresa por el río hasta alcanzar la segunda ataguía y comienza a almacenarse hasta cierto nivel en que el gasto se estabiliza

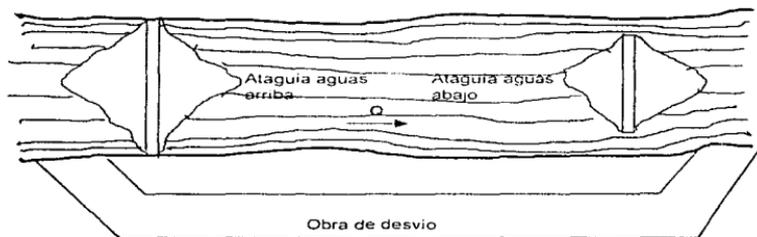


FIGURA II.14. ATAGUÍAS EN FORMA DE "I".

II. 5. 3 TÚNEL O LA PROPIA OBRA DE DESVÍO Como se ha mencionado con anterioridad, esta obra puede o no ser necesaria. En los casos ilustrados en las figuras II.12 y II.13, no es necesario construir esta obra, pues el cauce natural continúa transportando el agua del río, lo único que se debe cuidar en ese caso es que el material que conforma la ataguía no sea arrastrado por el flujo del agua y que la altura de la ataguía sea suficiente para que el agua no la brinque, pues al disminuir la sección del río y para un gasto constante, el tirante aumenta en el río. Para lograr el diseño adecuado de la altura de las ataguías, se debe hacer el tránsito correspondiente, tomando en cuenta que se tendrá una regulación por almacenamiento del agua antes de la ataguía, exactamente igual que para el caso de las ataguías en forma de "I".

La obra de desvío tiene como objetivo conducir el agua del río mientras se está construyendo toda la presa, puede ser un túnel o canal a cielo abierto dependiendo de los costos de construcción de la misma. Por ejemplo, si el material de las laderas del río es un suelo granular, se puede pensar en la construcción de un canal, haciendo una excavación con sección trapezoidal o en un túnel que habrá de revestirse de concreto armado, pero si el material fuera roca, se debe hacer un túnel, que dependiendo de las condiciones de la roca, se puede revestir ligeramente prácticamente para impermeabilizar o un concreto reforzado para evitar posibles deslizamientos de bloques de roca que podrían obstruir el túnel.

Para las ataguías en forma de "I", se tendrá una sobre-elevación del nivel del agua en todo momento, pues la plantilla del túnel o canal debe estar arriba del nivel del agua del río para evitar que ésta pudiera llegar a inundar la obra durante la construcción.

Su longitud varía dependiendo del tipo de cortina y de las condiciones del lugar, y puede tener cualquier pendiente pequeña, incluso horizontal. El agua siempre avanzará, pero debe tener capacidad para conducir el gasto máximo para un periodo de retorno de 50 años.

Esta obra trabajará durante la construcción de las diversas obras que conforman las obras, pero puede ser clausurada antes de terminar las obras, considerando que el nivel del agua tardará en subir dependiendo del tamaño del embalse, sin embargo la cortina debe estar lista para trabajar en cualquier caso, pues el empuje del agua comenzará a actuar sobre ésta en poco tiempo después de cerrar la obra de desvío.

La clausura de la obra de desvío varía dependiendo del tipo de obra de desvío que se trate. Para un tajo se arroja material reconstruyendo la excavación hecha para permitir el paso del agua. Para un túnel, se colocan compuertas antes de ponerla a trabajar y una vez que el flujo de agua ha cesado, se coloca un tapón de concreto de varios metros de espesor que soporte el empuje hidrostático cuando el nivel del agua suba al máximo (ver figura II. 15). Cuando el concreto ha alcanzado cierta resistencia, las compuertas se pueden recuperar si se requiriera o dejarlas ahí permanentemente.

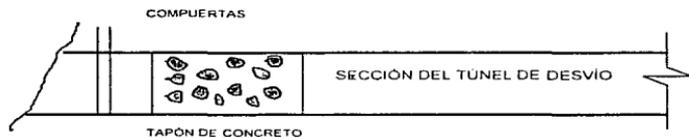


FIGURA II. 15 ESQUEMA DE UN TAPÓN DE CONCRETO PARA CLAUSURAR LA OBRA DE DESVÍO

II. 6. OBRA DE EXCEDENCIAS

II. 6. 1 VERTEDOR Comenzaremos diciendo que la obra de excedencias, que es el propio vertedor, tiene como finalidad, descargar los volúmenes de agua que se han considerado excedentes de la capacidad útil en un vaso de almacenamiento. La obra de excedencias debe tener la capacidad hidráulica suficiente y su descarga estar localizada de tal suerte que no dañe ni el talud aguas abajo de la cortina, ni el desfogue de la casa de máquinas ni cualquier otra estructura adyacente.

Las superficies de la obra de excedencias deben ser resistentes a la erosión para soportar las velocidades del agua.

VERTEDORES DE SERVICIO Y AUXILIARES:

Se denomina vertedor de servicio, aquella estructura que sirve para descargar con mayor frecuencia y desde los niveles altos de una presa los volúmenes excedentes; debido a este hecho en su diseño debe considerarse el factor de frecuencia de descarga.

Es recomendable el empleo de vertedores auxiliares cuando las descargas por un sólo vertedor sean de consideración, cuando uno sólo resulte incosteable, cuando un sitio sea insuficiente, etc. Cuando aguas abajo del sitio de descarga no se permitan gastos extraordinarios, es alternativo construir un vertedor auxiliar que descargue a un cañón o valle.

ESTRUCTURAS COMPONENTES DE LA OBRA DE EXCEDENCIAS:

ASPECTOS GENERALES: Como resultado de los estudios de tránsito de la avenida de diseño a través de un vaso, se obtiene la carga máxima $H_{máx}$ y el gasto máximo $Q_{máx}$ para el cual deben dimensionarse las diferentes estructuras que forman la obra de excedencias, aunque deben revisarse para todo el rango de gasto. Estas estructuras son: el canal de acceso o de llamada, la estructura de control, el conducto de descarga, la estructura terminal y el canal de desfogue.

CANAL DE ACCESO: El canal de acceso sirve para captar agua del vaso y conducirla a la estructura de control. Dependiendo del tipo de obra de excedencias, esta parte puede ser requerida o no; por ejemplo, en una cortina vertedora no se necesita, mientras que en vertedores adosados a las laderas de la boquilla casi siempre son necesarios.

Las velocidades de entrada, la curvatura del canal y las transiciones deben ser graduales. La longitud del canal debe ser mínima por razones de economía. Se procura obtener una distribución uniforme del flujo en toda la longitud de la estructura de control.

Velocidades de entre 3 y 5 m/s y la eliminación de las zonas muertas en el canal, por lo general producen resultados satisfactorios.

ESTRUCTURA DE CONTROL: Esta estructura controla y regula los derrames del vaso y es en consecuencia una componente muy importante de la obra de excedencias.

Según el tipo de topografía y, por consecuencia, de obra de excedencias, la estructura de control puede ser de varias formas y estar libre o controlada; su elección, en mucho, debe depender del factor económico.

CONDUCTO DE DESCARGA: Los volúmenes liberados por la estructura de control, se conducen al río aguas abajo de la presa a través de esta estructura.

Los conductos de descarga usados más frecuentemente son: canales a cielo abierto, conductos a través o bajo la cortina y túneles a través de las laderas.

Estos conductos deben estar recubiertos con materiales resistentes a la acción de la socavación de las altas velocidades con las que funcionan, así como ser estructuralmente adecuados para soportar las fuerzas de sub-presión, empujes de tierra, cargas dinámicas, etc.

ESTRUCTURA TERMINAL: La estructura terminal tiene por función disipar un alto porcentaje de la energía que posee el agua al llegar a ella, de forma que la que le quede no provoque daños, o bien, lanzar el agua hacia adelante para lograr el mismo fin. En el primer caso se emplean los tanque amortiguadores o las cubetas disipadoras y en el segundo, las cubetas de lanzamiento. En todos los casos conviene revisar la posibilidad de emplear la cubeta de lanzamiento, ya que el altísimo porcentaje de los casos resulta más económico su empleo que el de las otras estructuras, aún en aquellas ocasiones en que el depósito del material socavado por el chorro produzca remansos tales que afecten a otras estructuras, como por ejemplo el desfogue de las turbinas, en cuyo caso se disminuirá la carga de trabajo y quizá la generación; en este caso habría que incluir en el costo de la obra la posible remoción del material depositado o bien, tomar en cuenta la posible reducción de generación de energía eléctrica. La práctica antigua, tomaba en cuenta el análisis económico para la selección de la estructura terminal, pero ponía unas limitantes muy fuertes al empleo de cubetas de lanzamiento; por lo cual su uso fue muy reducido. La investigación realizada alrededor de estas estructuras, ha permitido la recomendación de su empleo en muchos más casos.

CANAL DE SALIDA: El canal de salida es la estructura que capta el agua que sale de la estructura terminal; su función es conducir el agua que sale de la estructura terminal, hasta un lugar donde escurra de forma natural, pudiendo ser el lecho de un río. No siempre se requiere construir un canal de salida, esto depende de las condiciones topográficas, de la calidad de la roca, de la disposición de otras estructuras, etc.

CLASIFICACIÓN: Respecto a su forma de control, las obras de excedencias se clasifican como: de cresta libre y de cresta controlada.

Las primeras son aquellas en las que no se tienen compuertas y llegando el agua en el vaso a un cierto nivel fijo, la estructura vierte; las segundas, como su nombre lo indica, tienen un control para la descarga ejercido por compuertas de todos tipos.

En hidroeléctricas es recomendable el empleo de vertedores de cresta controlada; sin embargo, dado que para este caso se corre el riesgo de una mala operación o fallas en las compuertas, deberá estudiarse muy cuidadosamente su empleo.

El control se logra con diversos tipos de compuertas, dentro de la que se incluyen las de bisagra, tambor, deslizantes, radiales o de segmento y aún aquellas que se nombran agujas.

Otra clasificación es de vertedores en túnel y vertedores a cielo abierto. Para este caso, con que alguna de las partes esté construida en túnel a través de roca o bien de un conducto cerrado a través de la cortina, corresponderá a los vertedores en túnel; los demás serán a cielo abierto.

En un vertedor en túnel se debe proporcionar una aireación suficiente para evitar la posible acción de sifón que resulta cuando un tramo del túnel tiende a sellarse temporalmente debido al desalojamiento de aire causado por ondas o por remansos.

Con excepción de vertedores en embudo, los demás vertedores en túnel se diseñarán por lo general para trabajar parcialmente llenos en toda su longitud. Para garantizar este funcionamiento, el área hidráulica ha de quedar limitada cuando mucho al 75 por ciento del área del túnel.

Aparte de las clasificaciones señaladas, algunas obras de excedencias son conocidas por un nombre propio que les viene de cierto rasgo característico de alguna de sus partes o por su disposición; tales vertedores una vez definidos, son fácilmente identificables. Cabe aclarar que aunque tal nombre no permite reconocer todas y cada una de las partes de la obra de excedencias, sí involucra a un buen número de ellas, por lo que, si requiere de una identificación completa, bastará con añadirle al nombre correspondiente de la parte complementaria. Los más conocidos son:

- Vertedores de caída libre
- Vertedores de cimacio
- Vertedores en abanico
- Vertedores en medio abanico
- Vertedores de canal lateral
- Vertedores en rápida
- Vertedores en embudo
- Sifones vertedores

VERTEDORES DE CAÍDA LIBRE: Los vertedores de caída libre son los que se localizan en la parte superior de un embalse, que tiene un desarrollo muy corto y que después de la estructura, el agua tiene una caída libre. Por lo que respecta a su desarrollo, quedan incluidos los de pared delgada, aquellos en los que hay un pequeño desarrollo del cimacio y aquellos otros en los que después del pequeño cimacio se remata la estructura con una cubeta de lanzamiento. Pueden ser de cresta recta o curva y haber o no compuertas de control.

Este tipo de vertedores es recomendable para las presas de arco y para las de sección gravedad vertedoras.

La parte inferior de la lámina vertiente debe estar suficientemente ventilada para prevenir pulsaciones.

Cuando no se suministra una protección artificial en la base de la caída, la erosión produce un pozo; para valorar la forma aproximada y sus dimensiones, se recomienda aplicar la fórmula de Veronese

La profundidad límite según Veronese, basado en datos experimentales es:

$$d_s = 1.9 H_T^{0.225} q^{0.54}$$

donde:

d_s profundidad máxima del colchón formado abajo del nivel del agua del remanso, en m, igual al colchón inicial más la socavación final. Nótese que es independiente del diámetro de las partículas.

H_T caída desde el vaso al nivel de remanso, en m.

q gasto unitario, en $m^3/s/m$

En general este tipo de vertedor no es recomendable para caídas mayores de 10 m. Sin embargo, si se necesita poner este tipo de vertedor cuando hay una gran caída, se recomienda emplear la ataguía de agua abajo de la cortina para crear un tanque amortiguador en la descarga, o bien, construir una estructura similar a propósito, revisando siempre que se provea de un colchón de agua suficiente para que únicamente con él se destruya la energía o bien se coloque una losa complementaria anclada a la roca en la base del tanque.

VERTEDORES DE CIMACIO: Se llaman vertedores de cimacio aquellos constituidos por una cresta de control curva que debe tener aproximadamente la forma de la superficie inferior de la lámina vertiente de un vertedor de cresta delgada ventilado. La superficie curva descrita continúa en una rápida de alta pendiente tangente a ella y relativamente corta, que está rematada con una superficie curva contraria a la cresta, la cual debe llegar tangente a la plantilla de un tanque amortiguador, a un canal de descarga que ya no es parte del vertedor sino a un canal de conducción, o a un salto de esquí.

VERTEDORES EN RÁPIDA: Se designa con este nombre a aquellas estructuras que están constituidas de un cimacio recto o normal a un canal que le sigue y colocados en la parte superior de un embalse. Se ponen con frecuencia por encima de alguno de los empotramientos de la cortina o en algún puerto

Para reducir las excavaciones, el tramo inicial del canal se escoge con poca pendiente hasta casi interceptar el perfil del terreno. A partir de este punto el perfil se

escoge aproximadamente como el perfil del terreno natural. Debe tenerse la precaución de revisar la posibilidad de ocurrencia de problemas de cavitación en el canal.

Cuando por razones topográficas, el eje del canal de entrada o el de conducción deban curvarse, esta curvatura se dará de preferencia al canal de entrada.

Para un buen funcionamiento hidráulico, deben evitarse cambios bruscos de la plantilla en el sentido vertical y en el ancho del canal. Si se requiere un cambio en su ancho, este debe ser gradual.

VERTEDORES EN CANAL LATERAL: Se llaman vertedores en canal lateral, aquellos que tienen un tanque-canal colector paralelo de la cresta vertedora, seguido de un canal conductor o rápida. Generalmente la cresta vertedora es recta, pero hay ocasiones, en que se hace curva y otras en que el extremo de aguas arriba de la cresta se continúa una curva pronunciada rodeando el mismo extremo del tanque - canal. Por último, una variante que también se ha construido, es con la cresta vertedora rodeando todo el tanque - canal, excepto por donde se continúa éste con el canal conductor.

El escurrimiento dentro del canal colector debe ser a régimen lento. Para garantizar este régimen, hay que propiciar en el tramo final del canal colector una sección de control proyectando un estrechamiento del mismo o un escalón vertical, normal al canal.

Debido al vertido lateral se propicia en el escurrimiento un remolino con eje paralelo al del canal que incrementa los tirantes; como este remolino originado en el canal colector se propaga a lo largo del conducto de descarga, para tomar en cuenta este efecto, debe incrementarse el coeficiente de rugosidad del conducto de descarga; ahora bien, como este incremento de rugosidad es muy difícil de estimar, se recomienda considerar para el diseño un coeficiente correspondiente a una rugosidad 30% mayor de la que especifique el acabado del conducto.

A causa de las turbulencias y vibraciones inherentes en el canal colector, un vertedor de este tipo debe considerarse sólo cuando exista una cimentación competente, como roca. Los recubrimientos del canal colector deben anclarse a la roca.

VERTEDORES EN ABANICO: Un vertedor en abanico, viene a ser una estructura constituida por un cimacio en curva cóncava con relación a la dirección media del escurrimiento y viendo en el sentido del mismo, el cual descarga a un tanque de geometría tal que propicia un resalto al pie del cimacio y un escurrimiento lento en aquél.

El nombre de vertedor en abanico le viene de que el cimacio y el tanque antes mencionado, así como las partes restantes de la estructura, tiene una forma similar al abanico. En el extremo del tanque se tiene una sección de control, después de la cual, a través de una transición en donde se va acelerando el escurrimiento, se llega a un canal de sección constante con régimen rápido.

Esta estructura cuenta antes del cimacio con un canal de acceso que obliga a que el escurrimiento sea normal al eje de la cresta vertedora y por eso es convergente.

Este tipo de vertedores se emplea cuando se requiere de una longitud de cresta considerable y además la topografía permite adaptar la estructura, su diseño tiene por finalidad reducir el costo de la estructura si se toma en cuenta su longitud de cresta.

VERTEDORES EN MEDIO ABANICO: Pueden considerarse como una variante de los vertedores de canal lateral y los de abanico. En general resultan más económicos que los vertedores de canal lateral, por lo que se recomienda hacer un estudio comparativo para su empleo: en cuanto a su funcionamiento hidráulico, puede seguir las reglas de diseño de los vertedores de abanico. La presa Punta de Agua tiene un vertedor de este tipo. Siempre que las condiciones topográficas lo permitan, pueden remplazar a los vertedores de canal lateral. Para describirlos basta con decir que, si un vertedor de abanico se parte por la línea de corriente media se obtienen dos vertedores medio abanico. Este tipo de vertedores ha sido empleado en pocas ocasiones pero las experiencias en los modelos indican que su funcionamiento es bueno.

VERTEDORES EN EMBUDO: La estructura de control está formada por un cimacio de perfil especial cuya cresta en planta es circular; el agua pasa a través de la cresta y cae en una lumbrera vertical o inclinada conectada a la zona de descarga en el río a través de un túnel o conducto casi horizontal.

Este vertedor consta principalmente de 5 elementos: una cresta ancha vertedora, transición, lumbrera vertical o inclinada, codo y túnel de descarga.

El control de este tipo de vertedor cambia al irse incrementando la carga.

Este tipo de vertedor muestra ventaja en su uso en presas alojadas en cañones estrechos donde las laderas se levantan rápidamente, donde casi siempre hay disponible un conducto o túnel de desvío para el tramo final del vertedor.

SIFONES VERTEDORES: Es un conducto de sección circular o rectangular, que en su desarrollo tiene una forma de "U" invertida. El extremo de la "U" que se coloca del lado del vaso de la presa y que es la entrada del sifón, casi siempre se encuentra sumergido, ya que el nivel normal de almacenamiento del vaso coincide con la cresta de la plantilla del conducto, mientras el otro extremo, que es la salida, puede estar o no ahogado. El conducto no es de sección constante sino que tanto la entrada como la salida, por lo general, tiene forma abocinada. Su funcionamiento es muy parecido al de un inodoro.

Hay que situar la entrada abajo del nivel de agua del vaso para evitar la intromisión de basuras y escombros o la formación de vórtices que por la inclusión de aire rompan la acción sifónica.

A causa de las presiones negativas con que trabaja el sifón, el conducto tiene que ser lo suficientemente rígido para resistir las fuerzas que tratan de colapsarlo. Las juntas deben ser estancas y deben tomarse providencias para evitar el agrietamiento del tubo a causa de movimientos y asentamientos de la cimentación. Para evitar presiones absolutas cercanas a las de vaporización se limita la carga negativa a un máximo de 6m.

II. 7. OBRAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA.

II. 7. 1 OBRA DE TOMA: La obra de toma es el conjunto de estructuras del sistema de almacenamiento, que permiten extraer los volúmenes de agua de agua en forma controlada, de acuerdo a la ley de demandas.

Existen diferentes tipos de obras de toma, de los cuales mencionaremos los más comunes:

- a) Torre y galería trabajando como canal.
- b) Tubería trabajando a presión
- c) Galería con tubería trabajando a presión.
- d) Mixto, es decir, un tramo de galería trabajando a presión y otro de tubería trabajando a presión alojado en la galería.

Todas las obras de toma deben de contar con un medio de control de la entrada de agua que funciona totalmente abierto o totalmente cerrado. Este dispositivo, que son generalmente compuertas rectangulares que suben o bajan, no es un dispositivo para controlar el gasto, sólo debe de cerrar o abrirse totalmente. La regulación de gasto se lleva con válvulas u otros dispositivos diseñados para este fin y que están cerca de la generación. Además de la propia compuerta, se debe de contar con un segundo dispositivo que permita mantener cerrado el acceso de agua y que pueda retirarse la compuerta para darle mantenimiento. Normalmente se hace un riel antes de la compuerta donde se pueden introducir vigas con sección "H" como se muestra en la figura II. 16:

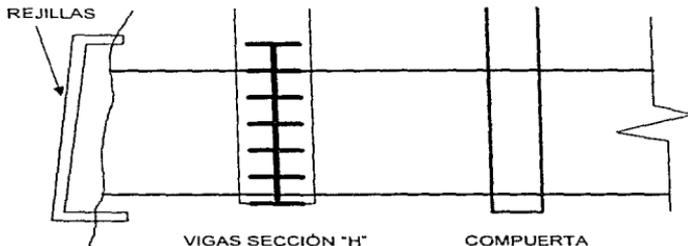


FIGURA II. 16 ESQUEMA DE LAS REJILLAS Y CIERRE CON VIGAS "H" EL FLUJO DE AGUA.

En la figura II. 16. También se pueden apreciar las rejillas. Estas tienen la función de impedir el paso de objetos sólidos que pudieran llegar a dañar las turbinas, obstruir el flujo de agua por alguna válvula, impedir el cierre adecuado de alguna compuerta, etc. incluso son una protección para algún loco que se pudiera acercar buceando y pudiera ser absorbido por el flujo de agua.

II. 7. 2. TÚNEL DE CONDUCCIÓN: Es la obra por la cual el agua llega desde la obra de toma hasta la galería donde se encuentran los equipos electromecánicos de generación de energía eléctrica. Esta obra puede consistir de varias secciones, pero generalmente consiste de un túnel de conducción que puede trabajar como canal y una tubería a presión esta obra lleva además de los dos tramos de tubería mencionados, una obra de alivio del golpe de ariete que se presenta a la apertura o cierre ya sea parcial o total de los dispositivos de control del gasto.

Esta obra es parte de la obra de toma y conduce el agua hasta la tubería a presión. Esta obra puede trabajar como canal o como tubería a presión, sólo que la presión de operación es menor que la "tubería a presión", por lo que aún cuando trabaje como tal, se le debe diferenciar, pues la conducción tiene un fin diferente, que es, como su nombre lo indica "conducir el agua" hasta el lugar donde es aprovechada, esta distancia puede variar mucho, desde unas decenas de metros hasta varios kilómetros de longitud. Esta obra se construye de la misma manera que un túnel de desvío, es decir, es un túnel de concreto armado, que puede tener cualquier sección como por ejemplo cuadrado, rectangular, rectangular con techo en bóveda, circular, herradura, etc. La sección transversal de la obra debe ser tal que las velocidades del agua sean bajas para evitar grandes pérdidas de energía, ya que como antes lo hemos mencionado, son obras que pueden tener grandes longitudes. Por lo mismo, el concreto debe estar pulido. Otra característica de esta obra es que la pendiente es muy pequeña, incluso puede ser horizontal.

Existen otros tipo de obras de conducción para diferentes aprovechamientos hidráulicos, por ejemplo riego, abastecimiento de agua potable, derivación, etc., los cuales no están dentro de los propósitos de ésta obra.

El cálculo de esta obra se puede llevar a cabo según el tipo de obra como un canal convencional o como cualquier tubería a presión.

II. 7. 3. POZO DE OSCILACIÓN: Al variar la demanda en una planta hidroeléctrica es necesario alterar el gasto, y para esto, el regulador de las turbinas, aumenta o disminuye automáticamente la apertura entre los alabes del distribuidor, según se trate de un incremento o de una disminución de la potencia demandada, respectivamente.

El generador que mueve una turbina, necesita un determinado par que varía de acuerdo con la demanda de potencia eléctrica, por lo que este par requerido está variando tanto como la población suministrada lo requiera. Para proporcionar este par, la turbina necesita variar el gasto que la mueve al mismo tiempo que la demanda varía

En una operación normal, los cambios de gasto son más o menos lentos, pero pueden ser muy bruscos si aparecen fallas tanto en los cables que salen de los generadores como en cualquier otro punto de la red cuando el sistema está interconectado. En efecto si la falla es en la planta en cuestión, la demanda cae a cero y la turbina tiene que cortar su gasto en el menor tiempo posible. Por el contrario, si la falla es en cualquier otra parte del sistema interconectado, la planta tendrá que aumentar súbitamente su potencia para suplir el déficit del sistema o para contribuir a aliviarlo.

La disminución de demanda, llamada por los ingenieros electricistas "rechazo de carga", puede manejarse con cierta facilidad en las turbinas Peltón, utilizando su deflector, pero no las de reacción, donde es necesario tratar el problema en toda su magnitud.

La situación antes descrita, trae como consecuencia la aparición de un golpe que el agua efectúa sobre toda la tubería, en forma de un aumento (o disminución) de la presión de trabajo en la tubería, pero además, la variación solicitada en el gasto no puede lograrse con rapidez si la turbina se encuentra muy alejada del vaso, de donde debe provenir el gasto perdido.

Por lo que respecta al golpe de ariete, sus efectos son menores mientras más corta sea la tubería de presión. Entonces, cuando la necesidad de colocar la casa de máquinas muy lejos del vaso, puede reducirse la longitud de la tubería a presión si se inserta en ella un tanque cuyo volumen permita almacenar una masa de agua suficientemente importante como para que las ondas de presión se reflejen en ella y no continúen propagándose hacia el vaso. Este tanque es precisamente la estructura llamada "pozo o cámara de oscilación" y debe colocarse lo más cerca posible de la casa de máquinas, ya que la tubería que une a ésta con el pozo es propiamente la tubería a presión. En la figura II. 17 se presentan varios casos de localización de pozos.

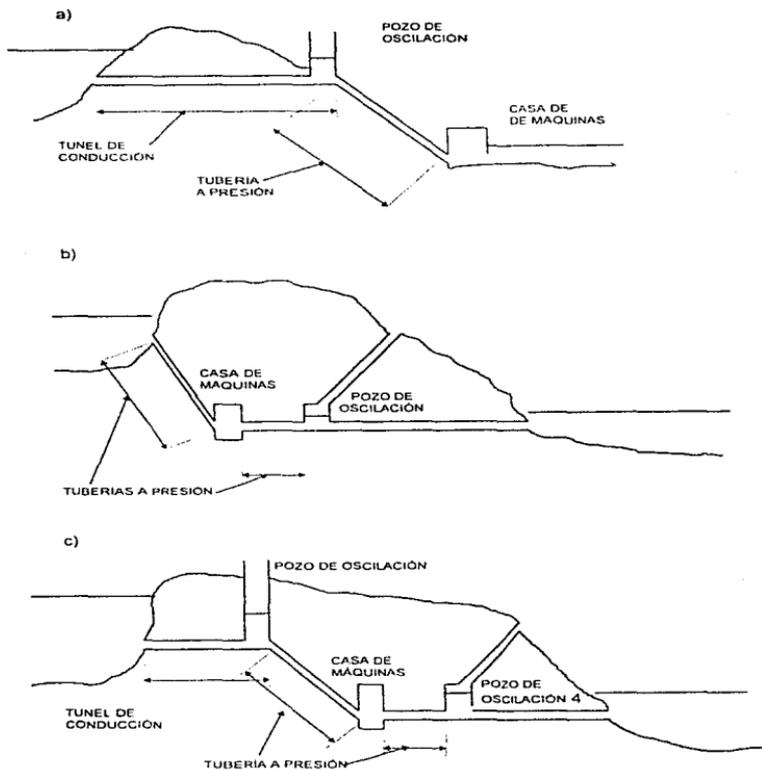


FIGURA II. 17 LOCALIZACIÓN DE POZOS DE OSCILACIÓN

FUNCIONAMIENTO DEL POZO

Al presentarse un cambio en la demanda, la variación solicitada en el gasto se logrará con más rapidez si se dispone de un pozo de oscilación. En efecto, si se pide menor gasto, el exceso que viene por el túnel de conducción entra en el pozo, elevando su nivel y, por consiguiente, en la línea de la energía; lo que hace que el flujo se frene y en esta forma, el vaso proporcione más rápidamente el gasto menor solicitado.

Lo contrario sucede cuando aumenta la demanda; caso en que el incremento del gasto necesario es suministrado más rápidamente por la cámara de oscilación que por el vaso, ya que la primera se encuentra más cerca de la turbina. Además, al salir el agua del pozo hacia la válvula, su nivel baja, e inclina el gradiente de energía en la conducción, lo que induce una aceleración del flujo en el túnel de conducción y favorece la obtención del nuevo gasto con mayor rapidez.

Por otra parte, al alterarse el nivel en el pozo de oscilación cambia también la carga en la turbina, y esto obliga a que el regulador siga actuando sobre los alabes del distribuidor con el fin de lograr la nueva potencia perdida. Durante este trabajo, el regulador tiende a excitar el cambio de los niveles del pozo. Por ejemplo, si se necesita menos potencia la carga sube debido a la elevación del nivel del pozo, provocada por el cierre en el distribuidor, pero el aumento consiguiente de la carga sobre las turbinas hace que se requiera aún menos gasto y el exceso es desviado hacia el pozo aumentando aún más su nivel. Lo contrario sucede cuando hay aumento en la demanda.

El problema de la excitación de las oscilaciones no existiría si se tuviera un volumen de agua infinito en la cámara, como puede considerarse el embalse, para fines prácticos.

En realidad, el pozo de oscilación debe tener un área transversal mínima para que pueda garantizarse que las oscilaciones no serán incrementadas por el regulador, sino que irán disminuyendo paulatinamente. Cuando esto sucede, así, se dice que el pozo es "estable".

En otras palabras, el volumen demandado o rechazado por las turbinas debe ser tal que no provoque variaciones tan grandes en el nivel del pozo, de manera que no sea posible lograr la nueva potencia solicitada. Esto tiene que ver con el área transversal de la estructura y con su altura total, características fundamentales en el diseño.

El mecanismo de variación de niveles dentro del pozo, por ejemplo para el caso de una apertura, puede describirse de la siguiente forma:

- El nivel baja al abrirse la válvula, pero la inercia lo hace bajar más de lo necesario para proporcional el nuevo gasto, por lo que momentáneamente, un volumen en exceso es desviado al pozo, obligando a elevar su nivel después de que éste alcanzó su nivel más bajo. Así empieza la primera oscilación.
- El nivel de agua sigue subiendo y nuevamente, por inercia, sobrepasa el punto deseado, e inclusive en las primeras oscilaciones rebasa frecuentemente la cota del embalse, inclinando el gradiente de energía en dirección contraria. Esto frena aún más la velocidad en el túnel de conducción, y cuando ésta llega a ser nula, el nivel del pozo alcanza su punto más alto y empieza a descender, por lo que el

flujo en la conducción se invierte, y envía el pozo al embalse todo el gasto que no acepta la turbina.

- El proceso continua y, si el pozo es estable, la fricción garantiza que las oscilaciones se amortigüen hasta desaparecer por completo. El caso de cierre puede explicarse en forma semejante.

TIPOS DE INSTALACIÓN:

En general, el pozo puede ser exterior o interior. Esta última localización se presenta cuando la casa de máquinas es interior; es decir, cuando se encuentra alojada dentro del cerro o dentro de la cortina de la presa.

Por lo que se refiere a su posición en relación a la casa de máquinas, el pozo de oscilación puede encontrarse aguas abajo o aguas arriba de ella.

La posición clásica del pozo de oscilación es antes de la casa de máquinas (figura II.17 a); pero cuando la casa de máquinas se encuentra en el interior del cerro o de la cortina, en muchas ocasiones el túnel de desfogue es muy largo y está sujeto a los efectos del golpe de ariete. Para que estos sean menores, se coloca una cámara de oscilación en el túnel de desfogue, lo más cerca posible de la casa de máquinas. Otra alternativa es colocar dos pozos, uno de cada lado. Ambas situaciones se presentan en las figuras II.17 b, y II.17 c, respectivamente. En ocasiones se colocan varios pozos juntos, generalmente no más de dos, en las posiciones indicadas en la figura II.17.

CONDICIONES PARA UN BUEN DISEÑO:

El pozo puede tener cualquier forma vertical o cualquier sección transversal. Sin embargo, si está bien diseñado debe tener las siguientes características:

1. Suficiente altura para no derramar, a menos que esté prevista esta situación; caso que se llama "pozo vertedor".
2. Suficiente volumen para no vaciarse; debido a que en este caso, permitiría que el aire entrara a la tubería de presión y llegar a las turbinas. Para evitar esta situación, el nivel mínimo debe estar unos 2 metros arriba de la clave del túnel de conducción.
3. Estable; es decir, su área debe ser tal que garantice que el regulador no excite las oscilaciones.

ii. 7. 4. **TUBERÍA A PRESIÓN** El tramo que conduce el agua del pozo de oscilación a las turbinas, se llama tubería a presión, sus principales características son: pendiente pronunciada, que "baja" el agua para mover los rodetes de las turbinas, es generalmente más corta que el túnel de conducción, tiene mayor resistencia, es de acero y en algunas ocasiones es exterior. Pero su principal función es aprovechar la energía del agua para la generación

Para esta tubería, se deben analizar el golpe de ariete que se presentará y con los esfuerzos obtenidos diseñar el espesor de la tubería de manera que resista las presiones máximas que van a presentarse

Lorenzo Allievi, analizó y desarrolló la explicación del fenómeno con ecuaciones matemáticas, también introdujo simplificaciones que no alteran de manera significativa los resultados.

CONCEPTOS PRINCIPALES UTILIZADOS EN EL GOLPE DE ARIETE

CELERIDAD: Es la velocidad con que se propaga la onda de presión a lo largo de la tubería (aproximadamente la velocidad del sonido en el agua de 1000 m/s)

PERIODO: Es el tiempo, en segundos, que tarda la onda de presión en ir de la válvula al vaso (o al pozo) y reflejarse hasta llegar nuevamente a la válvula.

TIEMPO DE MANIOBRA Es el tiempo en segundos que dura un cierre o una apertura de la válvula.

MANIOBRA INSTANTÁNEA O BRUSCA: Aquella que dura como máximo 1 periodo.

MANIOBRA GRADUAL O LENTA. Es la que dura más de un periodo.

TIEMPO RELATIVO DE MANIOBRA. Es el número de periodos que dura una maniobra.

Las tres últimas definiciones se refieren al hecho de que, en el golpe de ariete, no es el tiempo absoluto de maniobra el importante, sino la relación que existe entre el tiempo de cierre con la longitud de la tubería y con la celeridad de la onda, más propiamente dicho, su relación con el periodo.

El cálculo de las presiones debe ser hecho en varios tramos de la tubería, pues como se muestra en la figura II. 19, éstas varían a lo largo de la misma.

El análisis de esta distribución de presiones a lo largo de la tubería nos llevará a la elección de diferentes espesores a lo largo de la tubería para lograr un diseño más económico que si se considerara el máximo esfuerzo para toda la longitud de la tubería. Además de lo anterior, nunca se debe disminuir el espesor de la tubería a menos del especificado para su transportación, pues podría la tubería sufrir deformaciones que provocarían uniones inconsistentes u otros problemas en el flujo, la fórmula del espesor mínimo es:

$$\delta_{min} = (d + 1000)/400 \quad [d \text{ y } \delta \text{ en mm}]$$

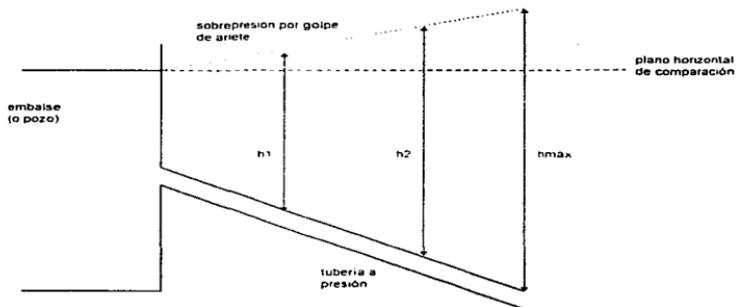


FIGURA II. 19. VARIACIÓN DE SOBREPRESIÓN A LO LARGO DE LA CONDUCCIÓN

II. 7. 5. CASA DE MÁQUINAS. La casa de máquinas es el lugar donde se alojan las turbinas que son máquinas hidráulicas. La turbina es accionada por la fuerza del agua, es decir, la fuerza del agua es aprovechada por la turbina y ésta a su vez mueve una flecha conectada a un generador eléctrico. La casa de máquinas aloja todos los elementos antes mencionados.

TURBINAS: Las primeras turbinas utilizadas eran ruedas accionadas por corrientes naturales y su fuerza mecánica se utilizaba para molinos de trigo. En su clasificación más general hay dos tipos de turbinas, las de *impulso*, que trabajan sometidas a presión atmosférica y las de *reacción*, cuyos rodetes se encuentran sometidos a presiones diferentes a la atmosférica.

TURBINAS DE IMPULSO: En la figura II. 20, se observa que la energía que recibe la turbina es la que hay a la salida de la tubería, en el punto 1 y después de accionar la rueda, el agua sale por la sección 2, en donde si aún hay energía, ésta ya no puede ser aprovechada por la máquina.

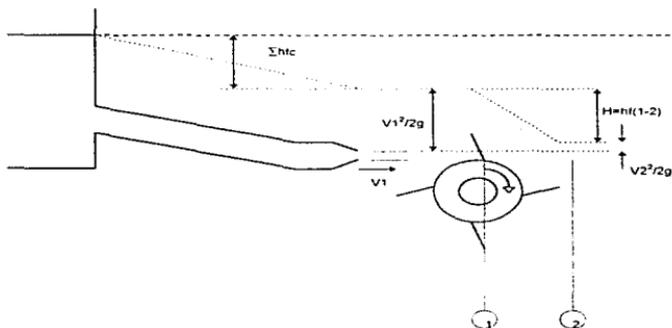


FIGURA II. 20 ENERGÍA APROVECHADA POR UNA TURBINA DE IMPULSO

En la figura II. 20 se aprecia que existe una pérdida a lo largo de la tubería de conducción, existe una pérdida no indicada en la figura debida al chiflón que impulsa el agua a las palas de la turbina, al chocar el agua con las palas pierde gran parte de la energía que trae haciendo girar la turbina y que se convierte en energía mecánica y finalmente queda algo de energía en el agua que ya no se puede aprovechar.

TURBINAS DE REACCIÓN: Estas turbinas se encuentran alojadas en una cámara hermética dentro de la cual las presiones cambian al paso del agua, por lo que la turbina aprovecha tanto la velocidad como la presión del agua, como se puede apreciar en la figura II. 21.

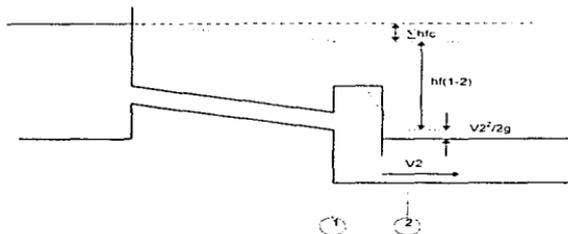


FIGURA II. 21 ENERGÍA APROVECHADA POR UNA TURBINA DE REACCIÓN

En la figura II. 21. se aprecia que la pérdida de energía mayor, se da dentro de la cámara, que es donde se aprovecha la energía del agua, nótese que no hay aire dentro de la cámara por lo que el agua además de la velocidad que lleva, también está a presión que ayuda a impulsar la turbina. La altura de la turbina con respecto al nivel de agua del desfogue debe ser pequeña para no acarrear bajas de presión menores a la presión de vaporización del agua que causan cavitación en los rodetes.

CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS TURBINAS: Como en cualquier otro caso, una clasificación puede hacerse desde diferentes puntos de vista, por ejemplo, en la forma en que el agua la hace girar, en los nombres de los inventores, etc.

Todos los enfoques utilizados para definir el tipo de turbinas son importantes y por eso se presenta una clasificación general donde se relacionan las máquinas mencionadas con algunas de sus características

patente	}	Peltón
		Francis
		Hélice (alabes fijos)
		Kaplan (alabes móviles)
		Reiffenstein (rodete Francis o Kaplan sin distribuidor)
		Bulbo (rodete Kaplan. sin espiral de alimentación)

forma de transmisión de la energía	<ul style="list-style-type: none"> ↳ Impulso (presión constante = presión atmosférica) ↳ Reacción (presión variable. diferente de la atmosférica)
Dirección del chorro al rodete	<ul style="list-style-type: none"> ↳ Axiales (entrada paralela al eje) ↳ Radiales (entrada según el radio del rodete) ↳ Radioaxiales (entrada oblicua al eje) ↳ Tangenciales (entrada tangencial al rodete)
Acción Radial	<ul style="list-style-type: none"> ↳ Centripeta ↳ Centrifuga
Posición del eje	<ul style="list-style-type: none"> ↳ Vertical (plano del rodete horizontal) ↳ Horizontal (plano del rodete vertical) ↳ Inclinada
Instalación	<ul style="list-style-type: none"> ↳ Sencilla (un rodete por eje) ↳ Múltiple (varios rodetes en un mismo eje)

Por lo que respecta a la forma de transmisión de la energía del agua al rodete , puede decirse que en realidad todas las turbinas trabajan bajo una combinación de impulso y reacción, pero es la acción preponderante sobre el rodete la que justifica, en forma muy general, clasificar en los dos dispositivos señalados, es decir: turbinas de impulso y turbinas de reacción.

A continuación se presentan algunas de las principales peculiaridades de las turbinas más importantes, clasificadas según su patente

PELTÓN

Turbina de impulso y de acción tangencial. El agua es dirigida al rodete por medio de chiflones. Si es horizontal tiene uno o dos chiflones. Si es vertical, puede tener hasta 8 chiflones. Trabaja con cargas altas, de unos 150 m a 2200 m, y gastos bajos menores de unos 30m³/s. Está sometida a la presión atmosférica, por lo que no puede estar sumergida. Su eficiencia se altera ligeramente por la variación de gastos y es más sensible a los cambios de carga

FRANCIS

Turbina de reacción radioaxial, generalmente centripeta. Alabes directrices del distribuidor móviles que permiten ser accionados por el distribuidor de la turbina para variar el gasto y tomar los cambios de la demanda. Alabes del rodete fijos. Cargas bajas y medias, de 25m a 380m aproximadamente, y gastos medios, del orden de 30m³/s a 200m³/s. Presión variable desde la entrada del rodete hasta abandonar el tubo de aspiración. Eficiencia sensible tanto a la variación del gasto como de la carga. Generalmente es vertical.

HÉLICE

Turbina de reacción, radioaxial. Propela con álabes fijos, centripeta. Gastos grandes, hasta de unos 500m³/s, y cargas bajas menores de 30m, aproximadamente. Presión variable. Fue la primera versión de turbina inventada por Victor Kaplan.

KAPLAN

Turbina de reacción, radioaxial Alabes de la propela móviles, se mueven automáticamente al variar las condiciones de operación lo que hace que la eficiencia se mantenga prácticamente constante durante el funcionamiento Gastos grandes, hasta unos 500m³/s. cargas bajas de 80m aproximadamente

CASA DE MÁQUINAS: Una planta hidroeléctrica consta de dos elementos principales: la casa de máquinas y la subestación elevadora. La casa de máquinas puede ser exterior o subterránea

Cuando se trata de una instalación vertical, que es la más común, la casa de máquinas tiene en general, dos niveles: planta alta o piso de generadores y una planta baja o piso de turbinas.

En el piso de generadores se encuentran estos aparatos con sus reguladores de velocidad, y en la parte superior de este nivel se instala una grúa viajera que se utiliza durante el montaje y también para hacer reparaciones, tanto de los generadores como de los rodetes. Por esta última razón el techo de la casa de máquinas debe ser lo suficientemente alto para que la grúa pueda transportar libremente los rodetes o los rotores por encima de los que ya están colocados.

En el piso de las turbinas se encuentran la espiral de alimentación, el distribuidor y el rodetes de las máquinas. La espiral y el tubo de la aspiración están embebidos en una gran masa de concreto ciclópeo que tiene la finalidad de absorber las vibraciones ya que si estas existieran serían transmitidas por la flecha al generador y se alteraría la separación entre el rotor y el estator, lo que provocaría problemas eléctricos inadmisibles.

Existen fórmulas empíricas que relacionan la potencia a instalar con el tipo de máquina y el peso mínimo de la cimentación necesaria para evitar los desplazamientos diferenciales de la flecha. La cimentación de la casa de máquinas se revisa por desplazamiento, no por volteo, debido a que su peso es de tal magnitud que el centro de gravedad siempre pasa por el núcleo central.

CAPÍTULO III EJEMPLOS

III.- EJEMPLOS:

CENTRAL HIDROELÉCTRICA AGUAMILPA.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.

OBRA DE DESVIO.

La obra de desvío en la Central Hidroeléctrica Aguamilpa - Solidaridad consta de dos túneles de sección portal que miden 16 m X 16 m sin revestir, localizados en la margen izquierda del río. El tipo de obra de desvío obedeció al tipo de cortina seleccionado y a la configuración topográfica del cauce.

Ambos túneles se excavaron en roca volcánica extrusiva denominada Unidad Aguamilpa. Se revistieron de concreto reforzado los 16 m de la entrada, las zonas de transición y a la salida del túnel número 2.

Los túneles de desvío tienen como objeto manejar el caudal del río durante la construcción de las obras de contención y otros frentes de la obra misma.

OBRA DE CONTENCIÓN:

CORTINA.

Se estudiaron diferentes opciones para el tipo de cortina conveniente para la Central Hidroeléctrica Aguamilpa - Solidaridad, incluyendo las de arco - gravedad, materiales graduados y enrocamiento con cara de concreto (RFC). Después de una cuidadosa evaluación técnica - económica se seleccionó la del tipo RFC, además del costo, los aspectos más importantes que llevaron a esta decisión fueron los de disponibilidad de materiales y tiempo requerido para la construcción.

La experiencia mundial en el diseño y construcción de RFC muestra que puede ser bastante confiable en su comportamiento y seguridad, como puede apreciarse en los casos de las presas más altas de este tipo construidas a la fecha, Foz de Areia en Brasil y Salvajina en Colombia, con 160 m y 148 m de altura respectivamente.

En el caso de Aguamilpa, la altura desde el desplante de la losa de pie hasta la corona es de 185.5 m, el área de la cara de concreto es de 136,900 y el volumen total de materiales utilizados es de 14.0 Hm³.

Principales características de la cortina:

Tipo aluvión - enrocamiento con cara de concreto

- Elevación de la corona	235 m s.n.m.
- Longitud de la corona	642 m
- Altura total al desplante	187.0 m
- Volumen total	14.0 Hm ³
- Desplante del plinto	49.5 m.s.n.m.
- Talud aguas arriba	1.5:1
- Talud aguas abajo	1.4:1
- Borde libre	3.0 m
- Área cara de concreto	136.900 m ²
- Volumen de concreto	68.500 m ³
- Acero de refuerzo	1.920 ton

El elemento impermeable de la cortina es la cara de concreto, su función no es estructural y su comportamiento depende de la deformación de los materiales de la cortina.

La cara de concreto está dividida en losas longitudinales de 15 m de ancho, el espesor de la losa es variable de 0.85 m en el fondo del río hasta 0.30 m a la altura del parapeto.

OBRA DE GENERACIÓN.

La planta hidroeléctrica cuenta con tres unidades generadoras de 320 MW cada una que generarán en promedio 2,131 GWh anuales. Las estructuras principales que conforman las obras de generación son: canal de llamada a cielo abierto, obra de toma, tres conductos a presión en túnel, casa de máquinas, equipo electromecánico galería de oscilación, lumbreras de buses y ventilación, plataforma de transformadores y subestación y túnel de desfogue.

OBRA DE TOMA

Del tipo en rampa apoyada sobre roca, consta de tres bocatomas protegidas por rejillas semicirculares, una compuerta auxiliar y una de servicio que obturan vanos de 5.81 X 7.40 m. Las compuertas se accionan mediante servomotores desde un piso de operación ubicado en plataforma a la elevación 235.00.

La alimentación se logra mediante un canal de acceso con plantilla a la cota 170.0.

Niveles característicos:

- Nivel Mínimo de Operación (NAMINO), 190,0 m.s.n.m
- Nivel Máximo de Operación (NAMO), 220,00 m.s.n.m.
- Nivel Máximo Extraordinario (NAME), 232,00 m.s.n.m

CONDUCCIÓN A PRESIÓN.

Los conductos a presión se inician a partir de las compuertas de servicio. Con una sección circular. La zona de transición va revestida de concreto reforzado y la zona con sección circular de 7.40 m de diámetro con revestimiento metálico y empacada con concreto simple.

CASA DE MÁQUINAS

La casa de máquinas, ubicada en una caverna excavada en la margen derecha del río Santiago, alberga los equipos electromecánicos y de acuerdo a éstos se definen los siguientes pisos: de turbinas, de generadores y de excitadores. Además, en el mismo lugar se encuentran también las galerías de drenaje, de inspección, de charolas y el cárcamo de bombeo.

La casa de máquinas cuenta con dos grúas con una capacidad de carga de 405 toneladas cada una, que acopladas pueden levantar el rotor, que tiene un peso de 725 toneladas.

EQUIPO ELECTROMECÁNICO

TURBINA HIDRÁULICA

Las turbinas hidráulicas son del tipo Francis vertical, marca Jarkov Turboatom.

DATOS TÉCNICOS

Cantidad	3
Velocidad nominal	150 rpm
Rotación:	en el sentido del reloj
Gastos de diseño por unidad	240 m ³ /s
Sobrevelocidad máxima	297 rpm
Caida neta máxima	157,30 m
Caida neta de diseño	145,10 m
Caida neta mínima	119,70 m

GENERADOR

La Central Hidroeléctrica cuenta con tres generadores eléctricos síncrono de polos salientes, de eje vertical, corriente trifásica y se acopla directamente a la turbina hidráulica Francis, con una potencia nominal de 341 MVA conectándose cada uno de ellos mediante un bus de fase aislada de 13800 volts y 14000 amperes al banco de transformadores, los que tienen una potencia trifásica de 375 MVA, y cuya función es elevar la tensión de 13800 a 400000 volts, siendo éste último el voltaje en que es entregada la energía al Sistema Eléctrico Nacional

Los generadores, brindan también energía eléctrica a los auxiliares, mediante una derivación en el bus de fase aislada, a través de transformadores, los que en este caso reducen el voltaje de 13800 volts a 480 volts.

Características técnicas del generador:

Potencia nominal	341 MVA
Tensión nominal	13.8 kV
Factor de potencia	0.95
Frecuencia nominal	60 Hz
Clase de aislamiento	Tipo F
Número de polos	48
Marca	Electrosila (Rusia)

GALERÍA DE OSCILACIÓN.

La galería de oscilación amortiguará los efectos de variación de presión ocasionados por los rechazos y toma de carga. Se localiza aguas abajo de los tubos de aspiración.

En esta galería se tienen las compuertas de desfogue, que aíslan al tubo de aspiración cuando se requiera desaguarlo.

La separación entre la galería y casa de máquinas (50 m entre ejes) obedece a condiciones geotécnicas del macizo rocoso. En un extremo de la galería se inicia el túnel de desfogue.

DESFOGUE.

Conecta la galería de oscilación con el río. Su diseño es tal, que considerando su longitud (391 m), la geología, el aspecto constructivo y la evaluación económica nos da las condiciones óptimas de trabajo. La geometría de 16 x 16 m, en sección portal y revestidos de concreto, cumplen ampliamente con los requisitos mencionados.

OBRA DE EXCEDENCIAS.

En la Central Hidroeléctrica Aguamilpa - Solidaridad el vertedor es del tipo controlado con compuertas y está formado por un canal a cielo abierto, con un muro separador, que tiene una capacidad máxima de descarga de 14,900 m³ por segundo, ésta fue determinada con base en criterios de transposición de ciciones y la precipitación máxima probable.

Consta de 6 vanos de 12 m de ancho, dividido en dos canales, uno auxiliar y otro de servicio. La política de operación de compuertas es tal que nos permite regular avenidas con un periodo de retorno de 70 años, sin descargar mas de 3.000 m³ por segundo.

La elevación de la cresta es la marcada como 210.00 y el labio de la cubeta de descarga la 140.00 alcanzándose una velocidad máxima de 38 m por segundo, por lo que fue necesario construir aireadores.

CENTRAL HIDROELÉCTRICA VALENTÍN GÓMEZ FARIAS.

La ciudad de Guadalajara, capital del estado de Jalisco, ha tenido una evolución acelerada en las dos últimas décadas. El crecimiento poblacional y el gran desarrollo industrial requerían suministro de agua potable y de energía eléctrica.

Del agua que se consume, esta ciudad desecha un alto porcentaje en forma de aguas residuales.

En la Central Hidroeléctrica de Valentín Gómez Farías se lleva a cabo un proceso nunca antes abordado en nuestro país. El transformar en energía eléctrica lo que hasta hace poco tiempo representaba un mero desecho, las aguas negras de la zona metropolitana que son saneadas directamente en la captación.

Esta Central desempeña una función vital para impulsar el progreso de la región de Occidente de México, produce electricidad por medio de dos unidades generadoras de 125 MVA cada una, con una capacidad instalada de 250 MVA.

De esta forma, la Central Hidroeléctrica Valentín Gómez Farías, aprovecha una parte sustancial de las aguas negras de la ciudad, mismas que se descargan regresándolas al río Santiago.

Las aguas negras residuales son captadas aguas arriba de la confluencia del río San Juan de Dios y el arroyo Atemajac, en el cruce con el periférico. Conducidas por gravedad a través de 6.1 km por medio de conductos cerrados construidos en zanjas y túneles hasta descargar en un vaso artificial ubicado en las cercanías del poblado El Tempizque, en donde se regularizan para ser extraídas diariamente. Esto en un tiempo promedio de generación de 5 horas, del tanque a la casa de máquinas, el agua pasa por una conducción forzada de diámetro variable y una longitud de 1.7 km para aprovechar un desnivel de 522.5 m.

La casa de máquinas está equipada, en una primera etapa, con dos turbogrupos generadores de 120 MW de potencia cada uno, con los cuales se obtendrá una generación media anual de 462 GWh.

LOCALIZACIÓN

La zona donde se encuentra la Central Hidroeléctrica Valentín Gómez Farías, se localiza en las inmediaciones de la ciudad de Guadalajara, Jal., en los municipios de Zapopan y Guadalajara.

Las captaciones Atemaj y San Juan de Dios quedan ubicadas dentro del Municipio de Zapopan, al norte de la ciudad, aproximadamente a 200 m del cruce de la calle prolongación Alcalde y el periférico que circunda Guadalajara.

La superficie del terreno que ocupa la conducción principal, el tanque de regulación, la tubería a presión, la casa de máquinas y la subestación eléctrica, quedan ubicadas dentro de la comunidad indígena de Mezquitán Zapopan.

El acceso al tanque Regulador se realiza por la carretera Guadalajara - Saltillo hasta el km 12.

Continuando por la misma carretera a la altura del km 16, se localiza la desviación a la casa de máquinas, desde donde parte un camino pavimentado de 8 km de longitud, éste comunica también, a los poblados de Hacienda del Laso y Tempizque.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.

CAPTACIONES

Las captaciones principales se encuentran en los cauces del arroyo Atemaj y el río San Juan de Dios, es de 8.76 m³/s. El cual una vez captado, es conducido por un conducto rectangular de concreto de 3.00 X 3.00 m y una longitud de 85 m hasta descargar en el área de la captación del arroyo Atemaj, cuyo gasto medio anual es de 11.39 m³/s.

El gasto medio anual considerado para la primera etapa de construcción en el río San Juan de Dios, es de 8.76 m³/s. El cual una vez captado, es conducido por un conducto rectangular de concreto de 3.00 X 3.00 m y una longitud de 85 m hasta descargar en el área de la captación del arroyo Atemaj, cuyo gasto medio anual es de 11.39 m³/s.

HIDROLOGÍA URBANA

Área de aportación de aguas residuales	270.35 km ²
Gasto medio anual asignado	11.0 m ³ /s
Volumen medio anual asignado	346.90 x106 m ³

	AÑO		
	1990	2000	2007
Gasto medio anual estimado m ³ /s	11.39	18.61	23.75

CAPTACIONES

SAN JUAN DE DIOS

Gasto medio anual m ³ /s	5.93	9.68	12.35
Gasto medio anual acumulado m ³ /s	8.76	14.32	18.25

ARROYO ATEMAJ

Gasto medio anual m	2.63	4.29	5.49
Gasto medio anual acumulado m ³ /s	11.39	18.61	23.75

CONDUCCIÓN

A partir de la captación Atemaj, las aguas se transportarán en conductos cerrados con una longitud del orden de 6 km. Esta conducción se compone de res túneles de sección tipo herradura y longitudes de 1850, 130 y 1350 m, dos sifones invertidos de 3.80 m de diámetro, con longitudes de 1008 y 560 m por los que se llevará el fluido a un tanque artificial donde será regulado para extraerse diariamente, en un tiempo aproximado de 5 horas.

CONDUCCIÓN POR GRAVEDAD.

ZANJAS Y TÚNELES

Sección circular: diámetro interior (zanja túnel)	5.00 m
Relación máxima de llenado	81%
Longitud de zanja	654.57 m
Longitud de túnel	3132.42 m

SIFÓN

Sección circular: diámetro interior	3.80 m
Longitud	1008.58 m
Carga máxima	47.32 m

TANQUE REGULADOR

El tanque regulador forma un embalse artificial, el cual está constituido de materiales arcillosos y respaldos de enrocamiento y rezaga en la parte excavada del piso y muros perimetrales. Finalmente, está recubierto con una membrana de polietileno clorosulfonado (HYPALON) para garantizar la capacidad de estanqueamiento. El Tanque Regulador tiene una capacidad, en su primera etapa, de construcción de 1'270 000 m³.

Dentro del Tanque regulador existe un tanque sedimentador en el cual se captarán más del 98 % de los sólidos sedimentables que son arrastrados por las aguas negras.

TANQUE DE REGULACIÓN DIARIA

Capacidad útil	1'286 000 m ³
Capacidad de azolves	160 700 m ³
Capacidad total	1'446 700 m ³
Corona de muro	1 471 m.s.n.m.
NAMO	1 470 m.s.n.m.
NAMINO	1 458 m.s.n.m.
Piso del tanque	1 456 m.s.n.m.

OBRA DE TOMA

Número	1
Capacidad	105 2 m ³

CONDUCCIÓN A PRESIÓN.

La conducción a presión, inicia en un túnel, éste tiene 520 m de longitud, 5 m de diámetro y una carga estática máxima de 115 m. En este túnel, los últimos 130 m se revistieron con camisa blindada, mientras que, en el tramo inicial se colocó un revestimiento de concreto reforzado. A la salida, de dicho túnel, se instaló una válvula de seguridad y una bifurcación donde se inicia la tubería exterior de 874 m de largo con diámetros y variables de 3.80 a 3.20m y espesores de 2.54 a 5.08cm de acero de alta resistencia (tipo A-131-AH-36). Para la llegada a la Casa de Máquinas se tiene un último túnel de 204m de largo y 3m de diámetro que soportará una carga estática máxima de 522.5m y de rechazo de 585m.

TUBERÍA A PRESIÓN

Número de conductos	1
Pendiente	8.0%
Longitud	890m

CASA DE MAQUINAS

Esta construcción se localiza en la margen izquierda del río San Juan de Dios, es de tipo exterior con 20m de ancho, 76.50m de largo y 31m de altura. En esta se alojarán los dos grupos turbogeneradores y sus equipos auxiliares.

Después de ser turbinada el agua se reintegra, desde este punto, al río Santiago

TURBINAS

Las turbinas hidráulicas son de impulso, tipo Pelton con inyector, de eje vertical. Sus partes principales en el orden del paso del agua son, tuberías de distribución, inyector, rodete. Cuenta con un equipo para operar a contra presión.

DATOS TÉCNICOS.

Número de unidades	2
Tipo Pelton con chifones	6
Gasto de diseño por unidad	27.3 m ³
Carga neta de diseño	510.0 m
Potencia nominal	120.0 MW
Velocidad de rotación	300.0 rpm
Elevación del eje distribuidor	946.5 m.s.n.m.

GENERACIÓN

La Central contará con una capacidad total de 500 MVA repartida en cuatro unidades de 125 MVA nominales y 24 polos, cada una. En la primera etapa operarán dos unidades, es decir se tendrán 250 MVA con un factor de planta de 0.21, éstas se interconectarán mediante un bus de fase aislada de 16.5 KV y 5000 Amperes a los transformadores principales, cada uno de los cuales tiene una potencia trifásica de 85/113/140 MVA. Esto eleva la tensión de generación de 16.6 KV a 230 KV, con objeto de entregarla al Sistema Eléctrico de Occidente.

Capacidad nominal por unidad	125 MVA
Número de polos	24
Factor de potencia	0.95
Tensión entre fases	16.50 KV

POTENCIA Y GENERACIÓN

Número de unidades	2
Potencia por unidad	120 MW
Potencia total instalada (primera etapa)	240 MW
Factor de planta	22%
Generación media anual	462.3 GWh

GRÚAS

Número	2
Tipo	Viajera
Capacidad Gancho principal	120 Ton

TRANSFORMADORES

Número	
Tipo	Trifásico
Capacidad	85/113/140 MVA
Relación de transformación	16.5/230 KV

CONTROL DE LA CENTRAL

El Control de la Central cuenta con los elementos más modernos de la tecnología actual, la cual nos permite desarrollar diferentes grados de Control, Protección y Automatización. Logrando, a la vez, ejecutar jerárquicamente, las funciones relativas a arranque y paro de las Unidades en forma ordenada, manteniéndola estable y segura, durante las variaciones de carga y, bajo las condiciones de falla.

Con el propósito de cumplir adecuadamente con lo anterior, se establece la misma estructura en cada uno de los sistemas que la componen. Principalmente, se definen tres niveles de Control, para el mejor manejo de la misma: local manual, local automático y automático remoto. Los dos primeros se realizan en la Central, mientras que para el control remoto se ha instalado una estación Maestra en la Subestación Guadalajara - Norte, localizada a tres kilómetros de distancia desde donde se tiene control sobre las Unidades y los Servicios, por medio de las UTR's (Unidades Terminales Remotas) y el equipo de control programable, autómatas de Unidades y Servicios Auxiliares.

Como medio de enlace entre la Central y la Subestación Guadalajara - Norte, se emplean dos circuitos de fibra óptica, por medio de los cuales se establece: Comunicación, Control, Protección y Medición. Se utilizan los equipos ópticos adecuados en los extremos de estos enlaces. Arreglos similares se emplean en las comunicaciones hacia el Tanque Regulador y Captaciones (San Juan de Dios y Atemajac).

CENTRAL HIDROELÉCTRICA ZIMAPÁN.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.

OBRA DE DESVÍO

El túnel de desvío, de la Central Hidroeléctrica Zimapán tiene como objeto el manejar el caudal del río durante la construcción de las obras de contención y de diferentes frentes de la obra misma, para lograr esto, fue necesario construir una ataguía de materiales graduados y corazón impermeable de arcilla, de 37 50 m de altura.

La obra de desvío cruza las rocas sedimentarias de la formación geológica conocida como El Doctor y consta de un túnel de sección portal de 9.4 X 9.4 m sin revestir, localizado en la margen izquierda del río, con una longitud total de 566 m y está diseñado para un gasto máximo de 702 m³/seg.

Datos Técnicos:

Obra desvío, con TR = 20 años.

- Gasto máximo avenida
- Gasto de diseño, máximo
- Elevación ataguía aguas arriba
- Túnel sección portal
- Elevación de entrada
- Longitud total
- Velocidad máxima
- Cierre provisional
- Cierre definitivo
- Volumen de la avenida

810 m ³ /seg.
702 m ³ /seg.
1,409.50 m.s.n.m.
9.4 X 9.4 m
1,383.70 m.s.n.m.
566 m
8.90 m/seg.
obturadores metálicos
compuertas metálicas y tapón de concreto
553 mill.m ³

OBRA DE CONTENCIÓN.:

CORTINA.

Después de minuciosos estudios para determinar el tipo de cortina necesario para la Central Hidroeléctrica Zimapán, se seleccionó la del tipo Arco - Bóveda, debido a las características geológicas y topográficas de la boquilla ubicada dentro del cañón de El Infiernillo, la cortina tiene una altura desde el desplante hasta la corona de 203 m y es la más alta en su tipo en México. Ocupa además el segundo lugar en altura total de presas (después de Chicoasén) y es, a nivel mundial la sexta en altura, para presas tipo Arco-Bóveda.

Para lograr la adecuada cimentación de la cortina, se removieron los bloques sueltos y de roca alterada y descomprimida en toda el área de desplante, así como el material aluvial del cauce.

En cuanto al empotramiento de la cortina, en ambas márgenes del macizo rocoso se requirió del empleo de la técnica de "precorte" con el objeto de reducir el fracturamiento inducido en la roca por el empleo de explosivos.

La cortina tiene en su base 22m de ancho y en la corona 5 m con una ampliación a un camino carretero con dos bandas de circulación que una a las poblaciones de Cadereyta Qro. y Zimapán en el estado de Hidalgo, con una longitud de 130 m sobre la cortina. Se llega a la corona a través de 2 túneles uno en cada margen, ambos con una longitud total de 1,260 m

:Principales características de la cortina:

Tipo Arco-Bóveda de Concreto

- Elevación de la corona	1,565.00 m.s.n.m.
- Longitud de la corona	115 m.
- Altura total del desplante	203 m.
- Volumen de concreto	220,000 m ³
- Elevación del desplante	1,362.00 m.s.n.m.
- Bordo libre	2 m.

OBRA DE GENERACIÓN.

La Central Hidroeléctrica Zimapán, está equipada con 2 unidades generadoras del tipo Pelton, de 146 MW de potencia cada una, que en promedio generarán anualmente 1,292.4 GWh, lo que la convierte en la Central Hidroeléctrica con mayor potencia instalada en este tipo de turbinas en nuestro país

Las estructuras principales que conforman las obras de generación son: obra de toma, túnel de conducción, tubería a presión en túnel, pozo de oscilación, galería de válvulas, casa de máquinas, equipo electromecánico, galería de transformadores, galería de cables y ventilación, subestación y túnel de desfogue.

OBRA DE TOMA.

La elevación de la bocatoma es la 1,500 m s n m. es del tipo rampa, protegida por rejas, el control de la obra de toma es mediante la operación de una compuerta rodante, de 4.20 X 4.80 m, diseñada para contener una carga hidráulica de 60 m.

Niveles Característicos

- Nivel de Agua Mínimo de Operación (NAMINO)	1,520.00 m.s.n.m
- Nivel de Agua Máximo de Operación (NAMO)	1,560.00 m.s.n.m.
- Nivel de Agua Máximo Extraordinario (NAME)	1,563.00 m.s.n.m

CONDUCCIÓN

El túnel de conducción del agua se inicia a partir de la bocatoma, localizada aproximadamente a un kilómetro de la cortina, sobre la margen derecha del río. Es de sección herradura de 4 70 m de diámetro y tiene una longitud de 20.947 km. Es el túnel de conducción a presión más largo del mundo para Centrales Hidroeléctricas.

Para reducir el tiempo de excavación y colado, se excavaron cinco ventanas o túneles laterales de acceso en una zona de topografía accidentada y de alto grado de dificultad para llegar al túnel de conducción, esto permitió establecer más de diez frentes de obra a la vez, el túnel está revestido de concreto simple en prácticamente toda su longitud.

En cuanto al pozo de oscilación es de 12 m de diámetro y 135 76 m de altura, fue excavado con contrapocera y banque, tiene un revestimiento de concreto armado y su función principal es la de absorber el fenómeno llamado "golpe de aríete", que se presenta al abrir o cerrar los inyectores de las turbinas.

Junto al pozo de oscilación, se construyó una galería conocida como "galería de válvulas" que aloja a una Válvula "de mariposa" de 3,5 m de diámetro y su función es garantizar la seguridad de las instalaciones aguas abajo de la tubería a presión, para realizar labores de inspección y mantenimiento sin vaciar el túnel de conducción.

La tubería a presión fue diseñada con una inclinación de 60° y un desnivel de 500 m, para un gasto de 59 m³/seg.

Su diámetro interior con camisa metálica empacada en concreto es de 3.5 m, tiene una longitud de 1,050 m y antes de llegar a las unidades se da una bifurcación con un diámetro 2.10 m, esto con el objeto de alimentar a cada turbina.

CASA DE MAQUINAS.

La casa de máquinas de la Central Hidroeléctrica Zimapán, está ubicada en una caverna de 70 m de largo, 22 m de ancho y 33 m de altura, su excavación se inició a través de un socavón de exploración para llegar al nivel de bóveda, una vez estabilizada se banqueó el resto de la caverna. El volumen de roca excavada fue de 50,000 m³, en ella se encuentra el equipo electromecánico y de acuerdo a éste se definen los siguientes pisos: excitadores, generadores, turbinas y válvulas.

La casa de máquinas aloja una grúa del tipo viajera que tiene una capacidad de 290 toneladas la cual sirve para efectuar el montaje de las turbinas y sus generadores.

Anexo a la casa de máquinas, se localiza la galería de transformadores que se encuentra en una caverna de 81 m de longitud, 11 50 m de ancho y 11 m de altura, en ella están ubicados los 7 transformadores, 3 para cada unidad y uno de reserva

Con el objeto de conducir el fluido eléctrico, de la galería de transformadores a la subestación encapsulada en SF6 localizada en el exterior, fue necesaria la construcción de una galería llamada de cables y ventilación

EQUIPO ELECTROMECAÁNICO.

Las turbinas hidráulicas con que cuenta la Central Hidroeléctrica Zimapán, son del tipo Pelton, con una potencia de 146 MW cada una.

Datos técnicos

Cantidad	2
Velocidad Nominal	300 r.p.m.
Gasto de Diseño por Unidad	29.5 m ³ /seg
Nivel de Eje del Distribuidor	957.00 m s.n.m.
Nivel Medio de Desfogue	951.8 m s.n.m.
Carga Bruta Máxima	603 m.
Carga Mínima Bruta	563 m.
Carga Neta Mínima	523 m.
Carga de Diseño Bruta	593 m.
Carga Neta de Diseño	553 m.
Factor de Planta Media Anual	0.53

Generador

La Central Hidroeléctrica cuenta con dos generadores eléctricos síncronos de polos salientes, de eje vertical, trifásicos que se acoplan directamente a las turbinas Pelton, con una potencia nominal de 153.7 MVA conectándose cada uno mediante un bus de fase aislada de 16,000 volts y 6,000 amperes al banco de transformadores monofásicos de una potencia de 55 MVA cada uno, que se encuentran ubicados en la galería de transformadores, excavada a un lado de la casa de máquinas.

La función del banco de transformadores es elevar la tensión de la energía de 16,000 volts a 230,000 volts para su envío a la subestación

Características Técnicas del Generador.

Potencia nominal	153.7 M.V.A.
Tensión nominal	16 kv.
Intensidad nominal	5.546 A.
Factor de potencia	0.95
Frecuencia nominal	60 Hz.
Aislamiento clase	24
Número de polos	248 ton
Peso del rotor	ABB Galindo, S.A.
Marca	(España)

Turbinas y Generación.

Número de Unidades	2
Potencia por unidad	146 MW
Potencia Total Instalada	292 MW
Factor de Planta	0.53
Generación Media Anual Firme	1139.6 GWh.
Generación Media Anual Secundaria	152.8 GWh.

Grúas

Número	1
Tipo	Viajera
Capacidad	290/32 Ton.
Claro	23 m.

DESFOGUE.

Una vez que el agua cumple su misión de mover las turbinas, es encauzada de nuevo al río a través del túnel de desfogue, este es de sección portal de 4.8 m X 5.15 m y tiene una longitud de 304 m.

POZO DE OSCILACIÓN.

El pozo de oscilación que tiene una altura de 135.76 m y un diámetro de 12.0 m, tiene como función la de amortiguar los efectos de variación de presión ocasionados por los rechazos y tomas de carga de las unidades. Se localiza a 100 m aguas abajo de la sección de túnel de 4.70 m de diámetro y 18 m del eje de la conducción a presión, aguas arriba de la galería de válvulas.

OBRA DE EXCEDENCIAS.

En la C. H. Zimapán, para determinar las características del diseño de la obra de excedencias se estimó una avenida máxima probable con un período de retorno de 10,000 años.

El vertedor es una estructura que consta de dos túneles paralelos de 9.90 m de ancho, altura variable de 13.90 a 8.50 m y 500 m de longitud, estos son controlados por compuertas radiales de 9.90 m de ancho X 18.50 de altura y 20.00 m de radio.

Debido a las dimensiones de la sección transversal de los túneles vertedores, estos se excavaron en dos etapas, una frontal superior o de bóveda y la otra de banqueo para obtener así la sección completa.

La obra tiene una capacidad de diseño de descarga de 2,520 m³/seg que corresponde al tránsito por el vaso de una avenida con un gasto máximo de 2,960 m³/seg, a una velocidad máxima de 25 m/seg., conservando una relación de llenado de 0.65. El gasto de diseño fue determinado con base a los estudios de hidrología que consideraron los aspectos climatológicos e hidrométricos, de la cuenca que drena la Central Hidroeléctrica Zimapán.

CAPÍTULO IV EJEMPLOS

IV. CONCLUSIONES:

Para hacer una obra de edificación, no se necesita buscar un lugar propicio para hacerla, se puede hacer en cualquier lugar y casi en cualquier condición, lo que se debe cuidar en esos casos es la economía que le convenga a una persona para obtener una utilidad, es decir, para construir un edificio de oficinas, se debe buscar un predio en una zona que tenga cerca servicios como agua, energía eléctrica, drenaje, etc., se debe buscar una zona con edificios de características similares o que den cierto prestigio al edificio, todo buscando un atractivo para las personas que podrían ser posibles compradores o personas interesadas en alquilar una oficina con el fin de obtener utilidades por el edificio. Sin embargo, esta obra se puede construir en cualquier lugar, aún sin servicios, pues se le puede anexar un sistema de energía con un motor de combustión interna, o una central de energía solar, de igual manera, se puede excavar un pozo para obtener agua y hacer un conducto para enterrar los desperdicios, pero esta obra no tendría demanda alguna, por lo que sería incostruable construirla, a menos que alguna persona construyera un pequeño poblado nuevo.

Lo que se está tratando de decir es que las obras de edificación buscan una utilidad, pero su construcción no tiene limitaciones, por el contrario, una central hidroeléctrica no se puede construir en cualquier lugar, debe existir un terreno propicio para almacenar agua, debemos contar con escurrimientos suficientes para llenar el vaso, pues de nada serviría tener un contenedor de agua que nunca se va a llenar o que rara vez podría generar energía. Una obra de esta envergadura no busca obtener utilidades para una persona, sino que busca obtener un servicio a la comunidad, por lo que no importa que esté en un lugar comercial (que además sería imposible construirlo e ilógico tratar de hacerlo), por lo que se deben tomar en cuenta todos los estudios previos para lograr obtener el mayor beneficio social que pueda brindarnos la obra. Pero no termina aquí el objetivo de la obra, además debe ser segura y eficiente. Es por todo lo anterior que necesitamos realizar todos los estudios previos.

En la actualidad, ya se conoce el potencial hidroeléctrico del país gracias a todos los estudios que se han realizado a lo largo del tiempo, es por eso que es fácil escoger un lugar para realizar un proyecto hidroeléctrico.

El país solicita cada día una cantidad mayor de energía eléctrica, por lo que se deben buscar nuevas formas de generar energía, pues los recursos hidráulicos tienen un límite que no podrá cubrir la demanda de energía, sin embargo el propósito de esta tesis no se basa en un proyecto que dentro de poco será olvidado, por el contrario es con el fin de motivar la construcción de más proyectos hidroeléctricos hasta que se agoten para después utilizar fuentes de energía más costosa y no al revés como se está haciendo en la actualidad. Es ilógico que en un país en crisis se construyan proyectos de generación de energía costosos en lugar de aprovechar la energía que nos brinda la naturaleza.

Los estudios previos nos brindan la posibilidad de escoger con tiempo los recursos naturales con mayores posibilidades, los más fáciles de explotar y además nos permiten realizar proyectos seguros y eficientes, es por eso que son tan importantes. Otros estudios que no se mencionan en esta tesis, no por ser menos importantes, sino porque serían motivo de otro estudio muy complejo que escapa a los propósitos de este trabajo.

son los estudios de impacto ambiental, sin embargo dejaremos este tema para otra persona que se interese y le guste

En cuanto al capítulo dos, al comenzar a escribirlo, nos dimos cuenta de que era demasiado extenso como para resumirlo en un trabajo tan pequeño como es una tesis, se requerirían una serie de varios tomos, como una enciclopedia, para lograr capturar tanta información, son miles de puntos los que se deben tomar en cuenta para hacer cada una de las obras, por lo que decidimos dar a conocer un panorama general de lo que es un proyecto hidroeléctrico, nos gustaría que alguien en un futuro retomara este tema para corregirlo y complementarlo. No descartamos la posibilidad de en un futuro desarrollar una serie de libros que puedan guiar a estudiantes o ingenieros sin experiencia a desarrollar un proyecto para aprovechamientos hidráulicos

El vaso de almacenamiento requiere estudios detallados para poder valorar los beneficios obtenidos y compararlos contra el costo de la obra, siempre se debe buscar que el proyecto sea la mejor inversión, sin importar el precio de adquisición, pues como en la vida, lo barato no es lo mejor ni lo más económico, sino que se debe de buscar un máximo beneficio a través del tiempo. No sólo estamos hablando de beneficios económicos, pues recordemos que esta es una obra de construcción pesada, y la construcción pesada no busca utilidades, sino dar servicio a un mayor número de personas y una presa siempre tiene beneficios múltiples, por ejemplo el control de avenidas, el suministro de agua potable, el riego, etc.

La cortina es la obra más importante de una presa, cuando esta llega a fallar, todas las demás obras son inútiles, es la obra representativa de una presa, tanto así que a la cortina se le llega a conocer con el nombre de presa, es por eso que debemos poner en cada proyecto un especial cuidado a este elemento, escoger el tipo de cortina que brinde una mejor economía y principalmente, que se apegue a las necesidades del proyecto, por ejemplo, en un cañón que esté en zona de alta sismicidad, pero con un buen terreno para desplantarse, no se debe poner una cortina tipo arco bóveda, porque un desplazamiento del cañón podría separar a la cortina de sus cimientos o generarle esfuerzos mayores a los de diseño que podrían provocarle la falla, lo más adecuado es pensar en una cortina de tierra y enrocamiento que pueda recomodar sus partículas adaptándose a los posibles desplazamientos que pudieran ocurrir.

Como este ejemplo, existen muchas otras posibilidades que pueden hacer que se elija un tipo diferente de cortina y se deben analizar todas las posibilidades para siempre obtener la mejor opción. Este punto es aplicable a todas las obras de la presa, aunque tengan menor importancia, pues las experiencias que los ingenieros en obra nos han transmitido en las visitas, siempre nos han transmitido este pensamiento y siempre nos ha sido dada esta recomendación.

Para el cierre de cauces, sólo estamos tratando dos, deben desarrollarse más métodos de cierre de cauces, pero es uno de los puntos de este trabajo que tiene una dificultad especial por contar con poca información al respecto. Sin embargo se dio una muy breve explicación de cómo se cierra un cauce, lo mismo tratamos de hacer al describir las ataguías. Las ataguías son elementos importantes durante la construcción

de la cortina, se deben de diseñar con una altura tal que nos de un buen factor de seguridad para no tener accesos de agua a la zona de trabajo, es más importante la ataguía de aguas arriba para desviar el agua, pero el diseño se debe seguir de igual manera para ambas ataguías, pues si la ataguía aguas abajo llegara a fallar crearía un problema igual que si fallara la ataguía aguas arriba lo único que las diferencia realmente en importancia es la altura que se le debe dar a la corona

En cuanto al túnel de desvío, es la obra que se debe tener lista antes que cualquiera otra, esta obra comienza a trabajar cuando las otras se empiezan a construir, debe tener una altura tal que no entre el agua en ella hasta que se cierre el cauce del río, es tan importante como las ataguías, estos tres elementos deberán durar hasta que el proyecto sea concluido. Se puede empezar a construir la obra de excedencias, o el túnel de conducción u otros elementos antes de tener lista esta obra, pero no comenzarán a trabajar hasta que esta obra deje de funcionar.

En algunas ocasiones, se puede aprovechar esta obra como túnel de conducción, sin embargo esto es poco usual, debido a que es raro que coincidan las condiciones requeridas en el proyecto con las de la obra de desvío

La obra de excedencias es uno de los elementos más importantes de una presa, existen obras de excedencias que nunca se utilizan durante la vida útil de la obra, pero con una sola vez que funcione, habrá valido la pena haberla construido, además la probabilidad de que la obra funcione es alta, como la naturaleza es tan impredecible, siempre es mejor estar preparado. Ahora bien, en obras que cuentan con compuertas, también es necesario instalar un control antes de las compuertas para que se puedan insertar agujas e impedir el paso del agua a las compuertas para así dar mantenimiento a las mismas. Es recomendable utilizar compuertas radiales, pues es más difícil que se puedan atorar

Es importante seleccionar bien el tipo de vertedor a utilizar para no dañar los cimientos de la cortina, siempre se debe hacer un cuidadoso análisis de cada obra buscando la economía y la seguridad de la cortina o de obras que pudieran estar cerca de la caída del agua. Para el vertedor, siempre se debe de adaptar a la topografía del lugar como las demás obras, pero en este caso, uno tiene mayores posibilidades de adaptar un diseño al proyecto, aunque se debe de buscar el óptimo. Existen proyectos que al comenzar a construirse se tiene planeado construir un tipo de vertedor, y al hacer estudios y modelos en el laboratorio, se cambia el proyecto incluso varias veces antes de obtener el proyecto definitivo.

En cuanto a la obra de toma, se debe cuidar que el gasto máximo pase sin problemas, las compuertas de esta obra sólo son para apertura o cierre pero nunca para control, además deben operar sólo cuando el gasto sea pequeño a punto de cerrar el sistema, al igual que la obra de excedencias, debe tener lugar para colocar agujas que permitan dar mantenimiento a las compuertas. Pero a diferencia de la obra de excedencias, esta obra debe contar con rejillas que impidan el paso de elementos (como árboles o cadáveres de animales) que pudieran obstruir o dañar las turbinas o alguno de sus componentes.

El túnel de conducción debe tener un tamaño tal que las pérdidas por fricción sean pequeñas, para obtener un máximo de energía en las turbinas. El final de esta obra está en el pozo de oscilación. Algunas veces esta obra no es necesaria, pues la cercanía de la casa de máquinas con el embalse permite arrancar la tubería a presión desde el embalse, pero en algunas ocasiones llega a tener varios kilómetros de longitud, con curvas, por lo que se debe cuidar que la velocidad del agua sea pequeña y en consecuencia las pérdidas también.

El pozo de oscilación alivia el golpe de ariete pero no lo elimina, por lo que de todas formas se debe considerar el fenómeno para diseño de la tubería a presión aunque con una intensidad mucho menor gracias al pozo de oscilación. También se debe cuidar el lugar donde se debe instalar y el número de pozos de oscilación. En cuanto a la tubería se debe hacer un análisis de sobre y sub presiones a lo largo de la misma para poder variar el espesor y así lograr diseños eficientes más económicos.

Las recomendaciones para diseñar la casa de máquinas son, conocer el número y tipo de turbinas a instalar para poder diseñar su tamaño, hacerla lo más pesada posible para disminuir al máximo las vibraciones del equipo en caso de que existieran y se debe de contar con un techo amplio para alojar una grúa viajera con un espacio suficientemente grande para levantar tanto los generadores como las turbinas sin que exista el peligro de chocar con otros elementos, además se debe de contar con un espacio para depositar el equipo extraído para hacer las reparaciones correspondientes y se debe dejar también espacio para la posible instalación de más turbinas y generadores para cuando se requieran en el futuro.

En cuanto a las turbinas, se debe conocer la carga disponible y el gasto para poder seleccionar el número y tipo de unidades, y en rangos donde se pueda aplicar más de un tipo de turbinas, hacer un análisis para determinar cuales conviene utilizar, en este caso caemos en otro problema que es el de buscar proveedor, en donde se requiere un análisis más a fondo para determinar su utilización.

En cuanto a los ejemplos, se mencionan alguno de los proyectos con las principales características de sus diferentes obras donde conoceremos dónde se aplicaron algunas de las obras descritas a lo largo del capítulo II, podemos darnos cuenta de la gran variedad de soluciones posibles. Pero no acaba aquí el problema, cada día los problemas que se presentan en cualquier proyecto deben ser atacados con creatividad, sin apearnos a obras ya construidas, sino tomándolas en cuenta solo como una guía, como un ejemplo, pero no como una ley, pues es probable que aunque estas obras no tengan problemas, se podrían optimizar utilizando otro tipo de soluciones, alguna que no se haya utilizado y que ni siquiera exista. El ingeniero debe utilizar sus herramientas para analizar otro tipo de obras, para llegar a diferentes soluciones y de entre ellas elegir la mejor.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFÍA

- I - HUMBERTO GARDEA VILLEGAS
"APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS Y DE BOMBEO"
EDITORIAL, TRILLAS 1992
- II - ROBERTO MELÍ PIRALLA
"DISEÑO ESTRUCTURAL"
EDITORIAL, LIMUSA, 1985
- III - LEET Y JUDSON
"FUNDAMENTOS DE GEOLOGÍA FÍSICA"
EDITORIAL, LIMUSA
- IV - LINSLEY KOLER PAULUS
"HIDROLOGÍA PARA INGENIEROS SEGUNDA EDICIÓN"
EDITORIAL, MC. GRAW HILL
- V.- GILBERTO SOTELO ÁVILA
"HIDRÁULICA GENERAL VOLUMEN 1, FUNDAMENTOS"
EDITORIAL, LIMUSA
- VI.- C.F.E. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS
"MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES, HIDROTECNIA"
A 2.10 OBRAS DE EXCEDENCIA
- VII.- J. JESÚS ZARAGOZA ALVAREZ
TESIS "PRESA DE ALMACENAMIENTO EN EL RÍO TETLAMA ESTADO DE
MORELOS"
F.I. UNAM, MÉXICO, D.F., 1992
- VIII.- RODOLFO MONTAÑO CUADRA
"PRIMERO EL HOMBRE ZIMAPÁN"
PUBLICACIÓN DE C.F.E. IMPRESORES HUASTECA
- IX - MONTES DE OCA
"TOPOGRAFÍA"
EDITORIAL, REPRESENTACIÓN Y SERVICIOS DE INGENIERÍA