

CAP. I ASPECTOS GENERALES

1.1 INTRODUCCION

El proyecto Múltiple San Jacinto tuvo y aún tiene la finalidad del desarrollo regional del Valle de la ciudad de Tarija por:

- El aumento de las áreas cultivadas y regadas, la intensificación de los cultivos, la lucha contra la erosión, y como consecuencia ingresos mayores y más seguros para los campesinos. El área de riego del proyecto se extiende sobre 4.457 ha netas.
- La producción de energía hidroeléctrica con vistas a satisfacer una parte importante de las necesidades crecientes de la ciudad de Tarija, ahora abastecida principalmente por unidades térmicas y también a satisfacer las necesidades de los bombeos para el riego. Por eso se prevé la construcción de la presa bóveda San Jacinto, del dique la Tablada y de la planta hidroeléctrica.
- Los efectos indirectos del dicho proyecto a nivel regional del punto de vista social y económico.

La planta de la central hidroeléctrica de San Jacinto, se encuentra ubicada entre los 21°35'45" de latitud sur y 64°43'30" de longitud oeste del meridiano de Greenwich a unos 7 kilómetros al sudoeste de la ciudad de Tarija.

El aprovechamiento hidráulico se lo realiza a través de los aportes del río Tolomosa que tiene su origen en la cordillera de Taxara.

La central hidroeléctrica de San Jacinto forma parte del Sistema Eléctrico de la ciudad de Tarija, está constituida por dos unidades generadoras, cada una de ellas equipadas con dos turbinas tipo Francis de eje horizontal, con una potencia total de 8MW.

La puesta en servicio de la Central Hidroeléctrica de San Jacinto data del año 1989, formando desde entonces parte del sistema eléctrico de la ciudad de Tarija.

1.2 ANTECEDENTES

En una central hidroeléctrica se utiliza *energía hidráulica* para la generación de energía eléctrica. Son el resultado actual de la evolución de los antiguos molinos que aprovechaban la corriente de los ríos para mover una rueda.

Cuando nos referimos a la energía hidráulica, son muchas las ventajas que ofrece este tipo de energía como ser:

- La larga vida útil de este tipo de instalaciones las convierte en uno de los recursos renovables más utilizados en la actualidad. En el caso la ciudad de Tarija, ofrece una excelente vía para reducir la dependencia energética de térmica, sobre todo en época de lluvias.
- Además, ayuda a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, al servir como sustituto de otras fuentes más contaminantes para producir electricidad. Se calcula que cada kWh producido en una central hidroeléctrica evita la importación de unos 220 gramos de petróleo.
- Los recursos hidráulicos facilitan la gestión de los picos de demanda energética, ya que el agua depositada en los embalses está disponible para su uso. Por tanto, es una fuente renovable que permite su almacenamiento, lo cual ayuda a la seguridad del suministro.
- Es una energía barata, los costes de operación son muy bajos, existen mejoras tecnológicas constantemente que ayudan a explotar de manera más eficiente los recursos.

Pero entre todas las ventajas, la más descatada y de mayor efecto a largo plazo es la de su potencial como energía renovable. Se trata de un recurso procedente del agua de la lluvia y, además, esa agua empleada en el proceso puede volver a utilizarse.

1.3 JUSTIFICACION

Esta investigación queda justificada debido a que desde la puesta en funcionamiento en 1989 de la central hidroeléctrica de San Jacinto hasta la fecha, o sea, hace 26 años; no se realizó un análisis acerca del funcionamiento del sistema hidráulico, nunca se realizó una evaluación que verifique que el sistema hidráulico construido cumpliera las expectativas de eficiencia previstas en la etapa de diseño.

Adicionalmente a esto, en marzo de 1996, se redujo la altura del vertedero de excedencias en la presa bóveda de San Jacinto, implementando presas inflables que aumentaban la capacidad de almacenaje de agua en una altura de 1.50 metros; influenciando con esto de manera directa al funcionamiento de la central hidroeléctrica, pues con esto, se aumenta el salto bruto en época de lluvias y por ende la altura neta de trabajo de las turbinas, en este periodo.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el funcionamiento del sistema hidráulico construido para la central hidroeléctrica de San Jacinto, mediante el concepto de eficiencia hidráulica del sistema.
- Verificar el rango de explotación de las turbinas Francis; ambos componentes importantes y responsables de un funcionamiento eficiente y seguro de la central hidroeléctrica de San Jacinto.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

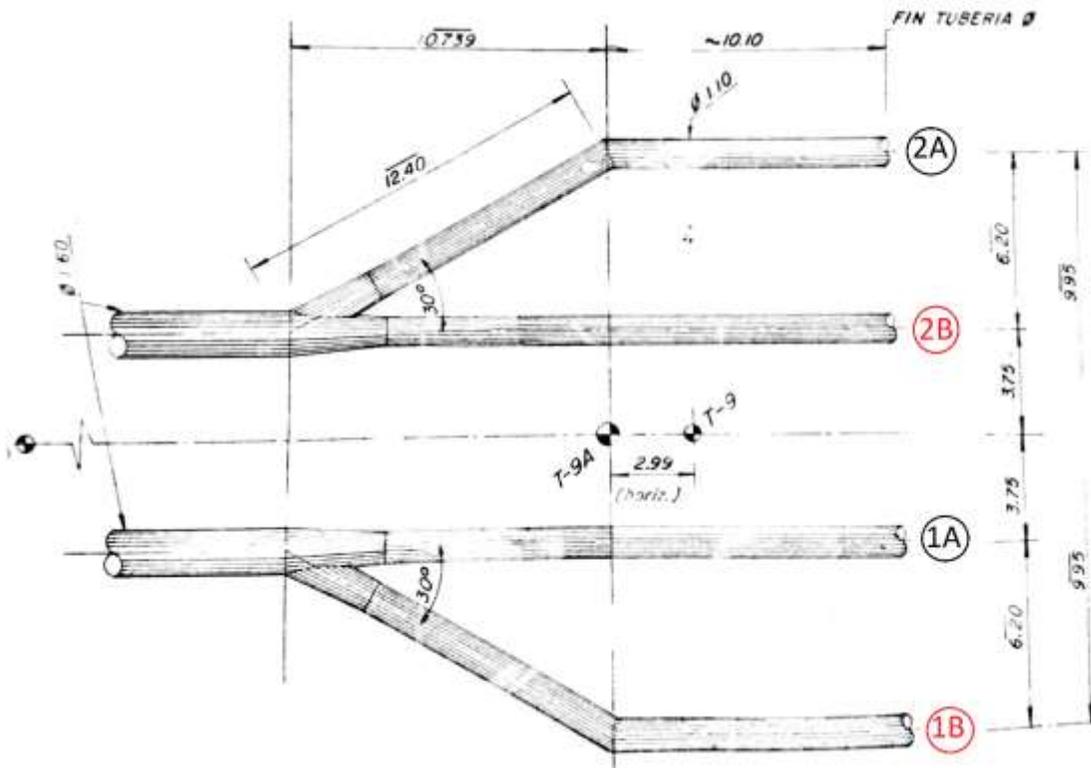
- Conocer de manera general las características de los elementos del sistema hidráulico, turbinas y demás características de la central hidroeléctrica de San Jacinto
- Identificación y análisis de los periodos óptimos de operación de la central hidroeléctrica de San Jacinto.
- Análisis del uso del recurso energético disponible en el embalse por la central hidroeléctrica de San Jacinto.
- Con los datos reales medidos en la central hidroeléctrica de San Jacinto, calibrar una ecuación para la altura neta en cada turbina en análisis, en función al nivel en el embalse.
- Conocer la eficiencia hidráulica para las diferentes turbinas en análisis.
- Conocer la altura neta promedio para las turbinas en época de lluvia.

1.5 ALCANCE

Es importante resaltar que tanto la evaluación del funcionamiento del sistema hidráulico y la verificación del rango de explotación de las turbinas Francis; se lo realizara particularmente para cuando se encuentre la central hidroeléctrica trabajando al 100% de su capacidad, esto quiere decir que la apertura del distribuidor a la entrada de las cuatro turbinas está totalmente abierto y en consecuencia las cuatro turbinas están funcionando simultáneamente a su máxima capacidad.

Para la realización de los cálculos necesarios para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación, se tomara como base de análisis y cálculos a las turbinas 1B y 2B, ver figura 1.1., esto debido que los cálculos y resultados para las demás turbinas serían los mismos, debido a la simetría geométrica y de forma de las tuberías que llegan a las turbinas y de las turbinas en sí.

Figura 1. 1 Identificación de turbinas base para el análisis de la investigación (1B y 2B)



Fuente: Archivos del Proyecto Multiple San Jacinto

También cabe mencionar y con las consideraciones mencionadas anteriormente, que la verificación del rango de explotación de las turbinas Francis de la central hidroeléctrica, se realizara solamente en su rango superior, esto debido a que fue en este rango donde posiblemente se vería la influencia en el incremento de la altura neta, ocasionado por la adición de la altura de las presas inflables que operan desde 1996 y que no fue contemplado en el diseño original de las turbinas, con referencia al rango

inferior, todas las variables se mantienen igual que en el análisis que se realizó para el diseño de las turbinas, en consecuencia no serán sometidos a análisis alguno.

1.6 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

La metodología será de un análisis documental con un enfoque cuali-cuantitativo y descriptivo, para lo cual se seguirá los siguientes pasos:

- Revisión exhaustiva de material bibliográfico como ser libros, papers, normas y demás documentación técnica referente al tema de centrales hidroeléctricas.
- Revisión particular y detallada a los documentos e informes finales de diseño, para obtener la base y criterio técnico con los cuales fueron diseñados todos los elementos componentes de la central hidroeléctrica de San Jacinto.
- Revisión de planos finales de construcción de todos los elementos que tienen influencia en el trabajo de la central hidroeléctrica de San Jacinto, para poder apreciar las diferentes características de los mismos como ser los niveles finales de cada elemento, etc.
- Se visitara las entidades competentes, para recabar datos generales acerca la generación eléctrica de la Central Hidroeléctrica de San Jacinto, de manera anual, mensual y diaria.
- Digitalización y procesamiento de datos obtenidos acerca de la generación eléctrica de la central hidroeléctrica de San Jacinto, para poder realizar un análisis del uso y operación de dicha central.
- Recabar datos referentes a los niveles de embalse diarios para diferentes años a considerar.

- Digitalización y procesamiento de datos de niveles de embalse diarios para diferentes años, de manera que se pueda utilizar dicha información para un análisis del uso del recurso energético disponible en el embalse para los años considerados y hacer una comparación con la operación de la central hidroeléctrica de San Jacinto.
- Elegir un año cualquiera para digitalizar información a nivel horaria detallada acerca del trabajo realizado por cada turbina cuando se encuentra la misma en funcionamiento; esto con el fin de recabar para cada hora trabajada durante todo el año considerado, de las turbinas datos de apertura de distribuidor, presión a la entrada de la turbina, presión a la salida de la turbinas.
- Programar un día en particular para realizar pruebas de generación eléctrica en la central hidroeléctrica de San Jacinto, de manera que se pueda realizar aforos relacionados a la generación eléctrica para diferentes estados de carga en las turbinas; y aforos de caudal según los diferentes estados de carga de las turbinas.
- Esta digitalización de datos nos permitirá encontrar la eficiencia hidráulica individual de cada turbina en análisis y la eficiencia global del sistema hidráulico.
- Esta digitalización de datos, también nos permitirá encontrar la altura neta para las turbinas
- Calibrar una ecuación que nos permita calcular la altura neta en función al nivel del embalse.

- Determinar la altura neta promedio para el periodo de lluvia, o sea, para cuando el embalse se encuentra lleno, de manera que se pueda verificar que dicha altura neta promedio en embalse lleno se encuentra dentro o fuera del rango superior indicado por el fabricante como rango de funcionamiento seguro de las turbinas Francis; esto con la ayuda del diagrama colinar de las turbinas Francis de la central hidroeléctrica de San Jacinto, proporcionado por el fabricante de dichas turbinas (VOITH).
- Con toda la información obtenida de libros, proyecto original, planos finales de construcción, digitalización de datos: de generación eléctrica de la central, niveles diarios del embalse para diferentes años, características de trabajo de las turbinas; cálculos realizados, análisis y resultados obtenidos; procederemos a redactar las conclusiones y recomendaciones que ameriten al caso.

CAP. II FUNDAMENTO TEORICO

2.1 REGIMEN DE CARGA DE UNA CENTRAL

Llamaremos central eléctrica al conjunto de máquinas motrices, generadores, aparatos de maniobra y protección, etc...que sirven para la producción de energía eléctrica.

La central eléctrica se denomina central hidráulica cuando las maquinas motrices son turbinas hidráulicas

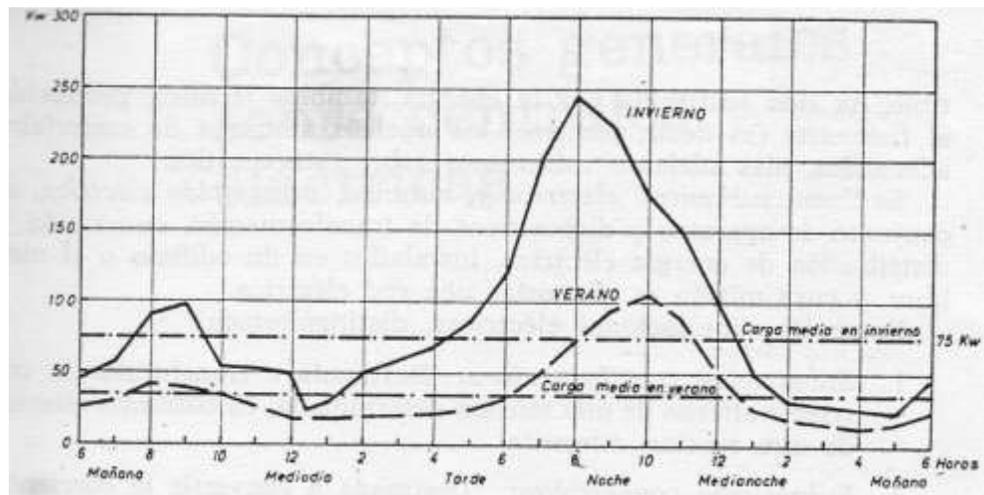
2.1.1 GRAFICOS DE CARGA

Las centrales eléctricas están destinadas a alimentar diversos receptores eléctricos (alumbrado, motores, hornos, etc.). Del número y potencia de estos receptores que en un momento dado, estén conectados a la red, dependerá la potencia que deba proporcionar la central eléctrica para cubrir la demanda. Pero sucede que esta demanda de energía eléctrica es variable en cada época del año, en cada día del año y dentro de cada día, es variable también a las distintas horas del día. En consecuencia, las variaciones de la carga en una central dependen de la clase de consumo que debe abastecer, es decir de las industrias, del comercio, de las horas laborables y de las costumbres de los habitantes de la región abastecida. Por ejemplo, las grandes industrias con horario continuo son consumidores convenientes por ser más o menos constante su carga durante el día; Los consumidores menos convenientes son los que necesitan solamente luz, porque cargan la central solamente en las primeras horas de la mañana y en las últimas horas de la tarde, siendo causantes de las breves pero altas puntas de cargas, consecuencia de lo cual en un mal aprovechamiento de la central

Para obtener una idea aproximada de las variaciones de carga durante el día en las centrales eléctricas se suelen determinar los gráficos de carga diarios. Para ello, bien sea por medio de un operador humano, o por un aparato registrador, todos los días se determina la carga de la central a intervalos de una hora, y los resultados se expresan en un sistema de coordenadas, representándose en abscisas las horas del día, y en ordenadas las demandas de potencia, que se expresan en kilovatios.

Los gráficos de carga diarios tienen distinto aspecto según se trate de una central de funcionamiento continuo, o de funcionamiento intermitente, y según la clase de aparatos receptores que predominen en la demanda de energía a la central, para fijar estas ideas, mostramos a continuación un gráfico de carga típico:

Figura 2. 1 Gráficos de carga para días laborables, de una pequeña central urbana con demanda predominante de alumbrado



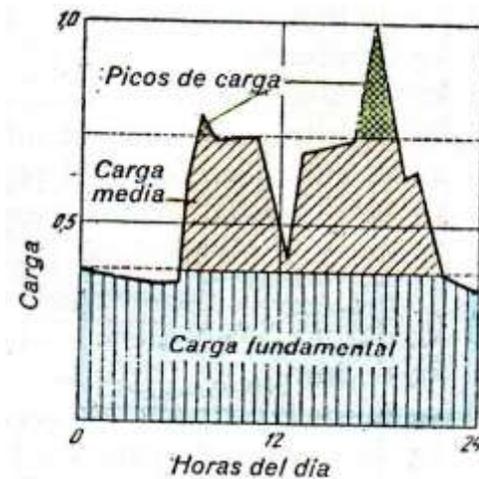
Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

En la figura 2.1 se representan gráficos de carga para un día laborable de verano y un día laborable de invierno, correspondientes a una central eléctrica de una pequeña ciudad; en la demanda predomina el alumbrado, existen también algunos pequeños motores, pero ninguna gran industria. En verano se aprecia algún aumento de carga, o punta de carga entre las 6 y las 10 de la noche. En invierno hay dos puntas de carga: una, menor, de 8 a 10 de la mañana y, otra, bastante mayor, de 6 a 12 de la noche, horas en que predomina el consumo de alumbrado. También en la figura se ha expresado la carga media en el verano y en el invierno, es decir, la potencia que habría de suministrar la central si la carga fuera constante. La carga media puede obtenerse fácilmente dividiendo por 24 el total de kilovatios-hora suministrado durante un día.

Como se puede apreciar, en este caso sencillo, la potencia que ha de suministrar una central varía entre amplios límites durante las 24 horas del día.

La carga de una central se puede dividir, como en la figura 2.2, en carga fundamental, carga media y puntas de carga. Si se reparte entre varias centrales el abastecimiento de un grupo de consumidores, se construiría por lo menos una central con embalse grande para las cargas de punta y la carga media, mientras la carga fundamental la pueden producir centrales sin embalses importantes.

Figura 2. 2 Repartición de la carga



Fuente: Schoklitsch. (1987). Tratado de arquitectura hidrúlica. Barcelona, España: Gustavo Gili

2.1.2 TIPOS DE CENTRALES ELECTRICAS

Según el tipo de servicio que hayan de prestar las centrales eléctricas se pueden clasificar en:

- **Centrales de base**, destinadas a suministrar la mayor parte de la energía eléctrica de forma continua. Estas centrales llamadas también centrales principales, son de gran potencia y utilizan generalmente como máquinas motrices las turbinas de vapor, turbinas de gas y turbinas hidráulicas.

- **Centrales de puntas**, exclusivamente proyectadas para cubrir las demandas de energía eléctrica en las horas punta; en dichas horas punta, se ponen en marcha y trabajan en paralelo con la central principal.
- **Centrales de reserva**, que tienen por objeto sustituir total o parcialmente a las centrales de hidráulicas de base en casos de escasez de agua o avería en algún elemento del sistema eléctrico. No deben confundirse con las centrales de punta, anteriormente citadas, ya que el funcionamiento de las centrales de puntas es periódica (es decir, todos los días a ciertas horas) mientras que el de las centrales de reserva es intermitente.
- **Centrales de acumulación o de bombeo**, que son siempre hidroeléctricas. Se aprovecha el sobrante de potencia de una central hidroeléctrica en las horas de pequeña demanda, para elevar agua de un río o de un lago hasta un depósito, mediante bombas centrifugas accionadas por los alternadores de la central, que utilizan como motores. En los periodos de gran demanda de energía, los alternadores trabajan como generadores accionados por turbinas que utilizan el agua previamente elevada.

2.2 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA HIDRAULICA

El agua que recorre sobre la superficie de la tierra en los ríos, tiene una energía cinética que gasta venciendo los obstáculos que se oponen a su libre curso; y, de esta forma, desarrolla calor, transporta materiales, erosiona las márgenes y el fondo, etc.

Esta energía cinética depende de la velocidad del agua la que a su vez, es función de la pendiente y de la rugosidad del cauce. Es imposible anular totalmente esa rugosidad pero puede disminuirse y, como consecuencia, el mismo caudal de agua podría circular con menor pendiente. De forma que podría derivarse la corriente de agua por un canal lateral con menor rugosidad y menor pendiente que el cauce primitivo. Con esto, la diferencia de nivel entre las aguas del canal y el cauce del río iría aumentando a medida que fuese mayor la longitud del canal. En un punto apropiado podríamos pasar este canal de agua por maquinas motrices hidráulicas que transformarían la energía potencial

del agua en energía actual devolviendo después el agua al río. De esa manera habríamos conseguido un salto de agua (es decir, un desnivel), con canal de derivación.

También se puede obtener este desnivel, elevando el nivel del agua por atajamiento de la corriente mediante una presa o azud. En este caso, aguas arriba del obstáculo puesto a la corriente, aumenta la sección en contacto con el agua, disminuye la velocidad necesaria del agua para dejar pasar el caudal del río y la pendiente necesaria para obtener dicha velocidad es menor que la que tenía la corriente.

Esta pendiente superficial va aumentando a medida que, aguas arriba, resulta menor la sección en contacto con el agua y de esta manera se forma una curva de remanso, que se enlaza tangencialmente con la superficie de las aguas en la parte del cauce no afectada por el remanso. Por consiguiente, se produce un nuevo régimen para la corriente, que permite formar un salto de agua aprovechable junto a la presa.

Entre las dos soluciones citadas (canal de derivación y presa) caben soluciones mixtas que son las más utilizadas: se ataja el río con una presa que embalse las aguas, las cuales se derivan junto a la presa, con un canal que se prolonga hasta el punto conveniente en que se sitúa la central, es decir las turbinas hidráulicas y los generadores por ellas accionados. De esta forma, el salto de agua se obtiene, en parte por la elevación del nivel del agua en la presa y en parte por la menor pendiente del canal respecto al cauce.

Indudablemente el aprovechamiento de la energía hidráulica, no hubiese sido posible sin la turbina; pero este aprovechamiento hubiera sido muy limitado sin la conversión de la energía mecánica de la turbina, en energía eléctrica que, como sabemos, puede ser transportarse a largas distancias. Esta característica de la energía eléctrica, ha permitido aumentar el radio de acción de los aprovechamientos hidroeléctricos. Antes, siendo muy limitada la capacidad de consumo dentro de la limitada distancia de transporte, las instalaciones hidroeléctricas eran de escasa potencia. Actualmente, sin la limitación indicada, la tendencia es a realizar grandes aprovechamientos con embalses de cabecera, que determina la regulación anual del río y depósitos reguladores, situados en lugares apropiados, con los que se consigue la regulación diaria o semanal. En conjunto, se pretende el aprovechamiento integral de un río o de

una cuenca completa (es decir, un río y sus afluentes), mediante sucesivos saltos de agua, construidos en los lugares más apropiados (por ejemplo, en los sitios de mayor desnivel, o cuando el cauce es angosto y elevado porque entonces la presa resulta más económica de construir, etc.)

En una central hidroeléctrica se utiliza *energía hidráulica* para la generación de energía eléctrica. Son el resultado actual de la evolución de los antiguos molinos que aprovechaban la corriente de los ríos para mover una rueda.

Cuando nos referimos a la energía hidráulica, son muchas las ventajas que ofrece este tipo de energía como ser:

- La larga vida útil de este tipo de instalaciones las convierte en uno de los recursos renovables más utilizados en la actualidad. En el caso la ciudad de Tarija, ofrece una excelente vía para reducir la dependencia energética de térmica, sobre todo en época de lluvias.
- Además, ayuda a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, al servir como sustituto de otras fuentes más contaminantes para producir electricidad. Se calcula que cada kWh producido en una central hidroeléctrica evita la importación de unos 220 gramos de petróleo.
- Los recursos hidráulicos facilitan la gestión de los picos de demanda energética, ya que el agua depositada en los embalses está disponible para su uso. Por tanto, es una fuente renovable que permite su almacenamiento, lo cual ayuda a la seguridad del suministro.
- Es una energía barata, los costes de operación son muy bajos, existen mejoras tecnológicas constantemente que ayudan a explotar de manera más eficiente los recursos.

Pero entre todas las ventajas, la más destacada y de mayor efecto a largo plazo es la de su potencial como energía renovable. Se trata de un recurso procedente del agua de la lluvia y, además, esa agua empleada en el proceso puede volver a utilizarse.

2.3 CLASIFICACION DE LAS CENTRALES HIDRAULICAS

Los tipos de centrales hidroeléctricas son variadísimos ya que, en todos los casos, la construcción de una central hidroeléctrica, se debe subordinar a la especial situación del río, embalse, etc....cuya energía se pretende aprovechar.

En el presente trabajo solo se mencionaran las dos clasificaciones de mayor importancia.

2.3.1 SEGÚN SU FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO

Analizando los tipos de centrales hidroeléctricas, desde el punto de vista de su funcionamiento hidráulico, estas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) Fluyentes
- b) De Almacenamiento
 - b1) Integradas a la Presa
 - b2) A pie de Presa
 - b3) Alejadas de la Presa
- c) De rebombeo

2.3.1.1 Centrales Fluyentes

Son centrales que se abastecen de una derivación en un río, sin capacidad de almacenamiento, o con una capacidad muy limitada, de manera que se utiliza el agua a medida que va llegando por el cauce.

En algunos casos particulares existe una pequeña capacidad para almacenar agua durante las horas de baja demanda eléctrica, lo que permite turbinar esa agua durante las horas de demanda pico de ese mismo día.

Las centrales fluyentes son apropiadas solamente para ríos que no sufren una excesiva disminución en su caudal durante la temporada seca, o cuando embalses situados aguas arriba de la derivación aseguran un caudal mínimo suficiente durante todo el año.

Las centrales fluyentes están constituidas por una presa de derivación, una toma, un canal, cámara de carga, tuberías, forzadas, central y canal de restitución (Fig. 2.3).

Las centrales fluyentes se utilizan generalmente en ríos de montaña de fuerte pendiente. El salto se logra mediante un canal con una pendiente suave, bastante menor que la del río. De esta manera la diferencia de cotas entre el canal y el río aumenta con el recorrido. Cuando se ha llegado a una diferencia de cotas conveniente, se termina el canal en las tuberías forzadas de acero que conducen el agua a las turbinas.

Figura 2. 3 Esquema de una Central Fluyente



Fuente: Elaboracion propia

El único elemento nuevo en estas centrales es la cámara de carga. La cámara de carga es un ensanchamiento acompañado de un aumento en la profundidad del canal al final del mismo y su función es la de transformar el régimen libre del canal en régimen a presión en las tuberías forzadas.

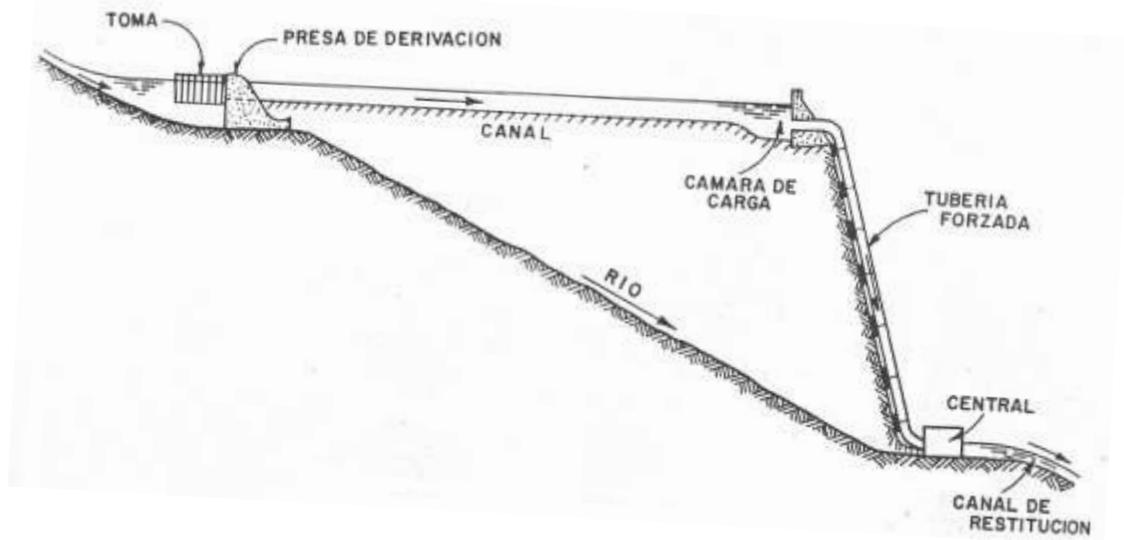
La capacidad de almacenamiento de la cámara de carga cumple las siguientes funciones:

1. Almacenar los volúmenes sobrantes, provenientes de maniobras accidentales, o de reducción de potencia en la central, para no perderlos.

Estas operaciones requieren pocos minutos, por lo que los volúmenes resultantes serán, en general, reducidos.

2. Compensar los volúmenes faltantes o sobrantes cuando en la toma se varia el caudal que entra al canal, mientras el efecto de esas variaciones alcanza el extremo aguas abajo del mismo (cámara de carga).

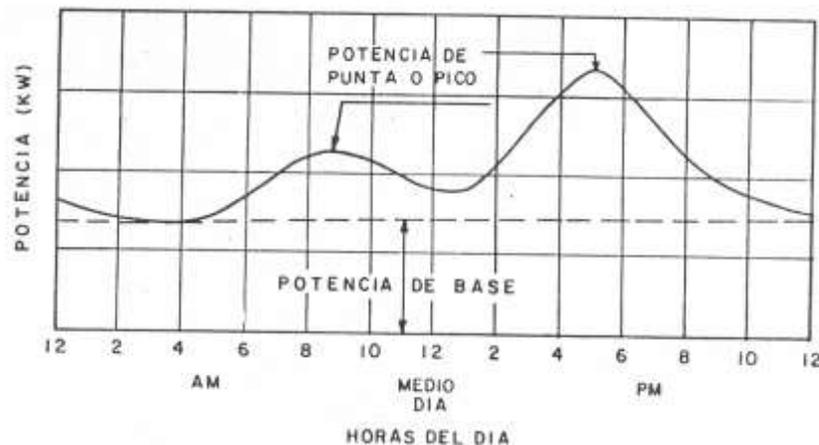
Figura 2. 4 Esquema transversal de una Central Fluyente



Fuente: Suarez. (1982). Ingeniería de presas. Caracas, Venezuela: Vega

Las centrales fluyentes son, en esencia, para trabajar en base (Fig. 2.5), pues al no existir una capacidad de almacenamiento importante, cualquier reducción en el caudal turbinado es agua perdida, lo que se traduce en una pérdida de energía irrecuperable. Por consiguiente, para obtener el máximo rendimiento de estas centrales, las mismas deben funcionar a lo largo del día a la potencia máxima que permita el caudal del río, o la capacidad del canal.

Figura 2. 5 Diagrama Diario Típico de Carga



Fuente: Suarez. (1982). Ingeniería de presas. Caracas, Venezuela: Vega

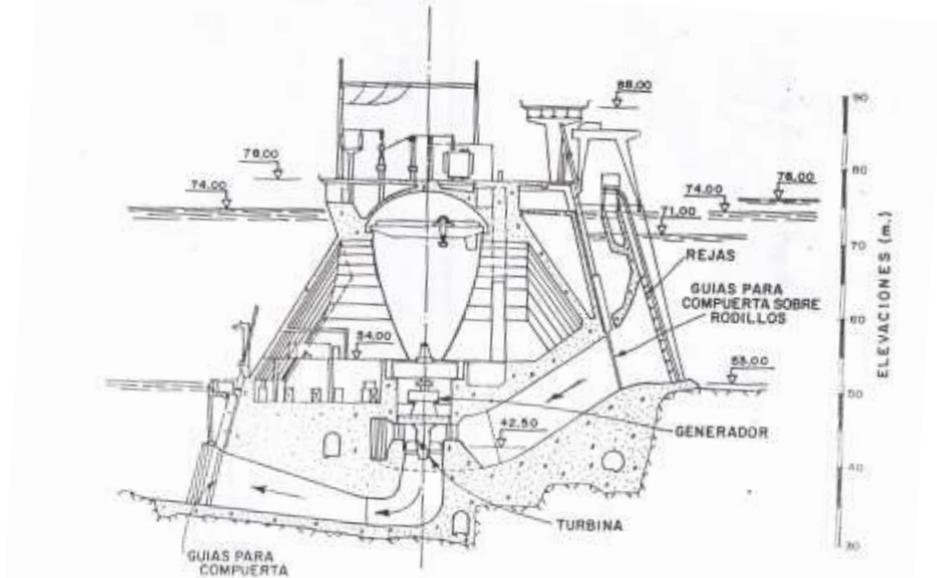
2.3.1.2. Centrales de Almacenamiento

Son aquellas que se abastecen de un embalse con capacidad suficiente como para almacenar el agua en la época de crecidas, lo que permite mantener parte de ese almacenamiento hasta el final de la época de sequía, de manera de regular un caudal constante durante todo el año, mayor que el caudal mínimo del río. La regulación puede ser anual o Interanual; en este último caso el embalse puede tomar varios años para llenarse y/o llegar al nivel mínimo de operación.

Las centrales de almacenamiento, de acuerdo a sus ubicaciones respecto a la presa, pueden ser Integradas a la presa, a pie de presa, o alejadas de la presa.

- **Centrales integradas a la presa.** Estas centrales forman parte de la propia estructura de la presa, a la cual están integradas (Fig. 2.6).

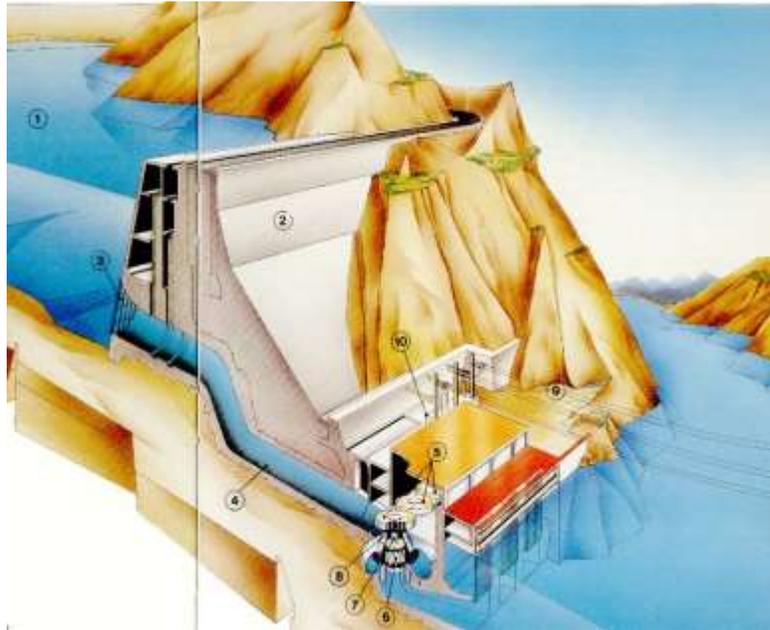
Figura 2. 6 Corte de una Central Integrada a la Presa



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

- **Centrales a pie de presa.** Este tipo de centrales está adosado a la cara aguas abajo de la presa, pero su estructura está separada de la misma, y el agua es conducida a la central a través de tuberías de acero a presión que atraviesan el cuerpo de la presa. (Fig. 2.7). Entre la presa y la central existe una junta para Independizar el comportamiento de ambas estructuras. Como las tuberías de toma deben atravesar esta junta, es necesario que ellas a su vez tengan también una junta que permita ciertos desplazamientos sin causar una rotura.

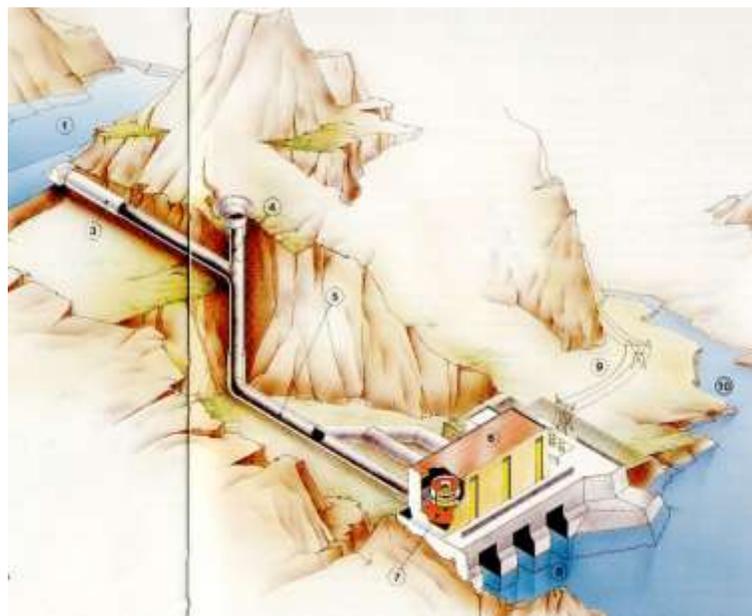
Figura 2. 7 Esquema de una Central a Pie de Presa



1. Agua embalsada
2. Presa
3. Rejas filtradoras
4. Tubería forzada
5. Conjunto de grupos turbina-alternador
6. Turbina
7. Eje
8. Generador
9. Líneas de transporte de energía eléctrica
10. Transformadores

- **Centrales Alejadas de la Presa.** Estas centrales se encuentran totalmente aparte de la presa, y el agua es conducida a ellas mediante un túnel, tuberías superficiales o una combinación de ambas soluciones.

Figura 2. 8 Esquema de una Central Alejada de la Presa



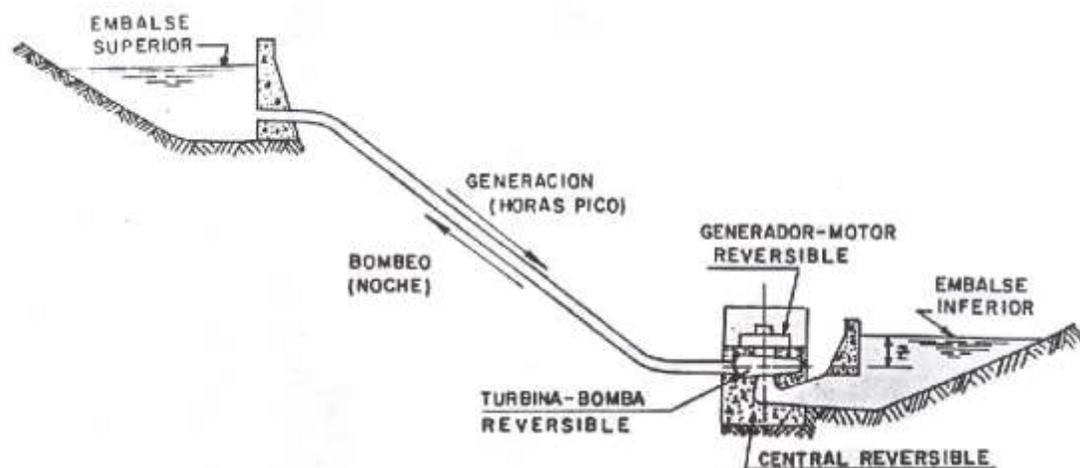
- 1.- Embalse superior
- 2.- Obra de Toma
- 3.- Galería de conducción
- 4.- Chimenea de equilibrio
- 5.- Tubería forzada
- 6.- Casa de Maquinas
- 7.- Turbinas y generadores
- 8.- Desagües
- 9.- Líneas de transporte de energía eléctrica
- 10.- Embalse inferior o río

2.3.1.3. Centrales de rebomdeo

Estas centrales aprovechan la energía del sistema eléctrico de un país, región o zona (interconectado) durante las horas fuera de los picos de demanda (Fig. 2.5) en que existe un excedente de la misma y que en el caso de centrales hidráulicas, si esa energía no se utilizara, se perdería en forma de agua vertida por los aliviaderos de las presas.

Con esta energía sobrante, la cual tiene un valor menor por no tener demanda, se bombea agua de un embalse o depósito bajo a uno alto (Fig. 2.9), donde se acumula para ser utilizada, fluyendo en sentido inverso y generando energía durante las horas de demanda pico en las que la misma tiene su mayor valor.

Figura 2.9 Esquema de un Sistema de Rebomdeo Reversible



Fuente: Suarez. (1982). Ingeniería de presas. Caracas, Venezuela: Vega

De esta manera se logra almacenar energía, en forma de agua embalsada en el depósito superior, la cual puede ser utilizada en las horas en que es más necesaria, ya que hasta el presente no ha sido posible resolver el problema de almacenar la energía eléctrica en las cantidades necesarias para satisfacer los requerimientos de un país.

Para evitar la utilización en forma separada de equipos de generación, por una parte (turbina-generador), y de bombeo, por otra (bomba-motor), lo cual incrementar los costos de estos aprovechamientos, dichos sistemas utilizan equipos reversibles, es decir, la turbina tipo Francis, cambiando el sentido de rotación se transforma en una bomba centrífuga y el generador, cambiando la polaridad, se transforma en el motor que impulsa la bomba.

Las centrales de rebombeo puras, es decir, aquellas constituidas por dos embalses cuya única función es la ya descrita, no consumen agua. Solamente es preciso obtener el volumen Inicial necesario para llenar uno de los dos embalses (ambos son de la misma capacidad) y suplir las pérdidas por evaporación e Infiltración que ocurran con el tiempo.

Cuando el funcionamiento es como turbina, ésta puede estar incluso ubicada por encima del nivel mínimo de embalse Inferior, aunque esto no es recomendable; pero cuando el funcionamiento es como bomba, la altura Z (Fig. 2.9) debe ser siempre positiva, generalmente con valores superiores a los 10 m para evitar problemas de cavitación.

2.3.2 SEGÚN LA ALTURA DEL SALTO

La clasificación de las centrales según la altura de salto (se entiende por salto la altura neta), es la más importante porque es el salto neto más que ninguna otra característica el que determina tanto la obra civil (presa, canal de conducción, conducto forzado, central) cuanto el tipo de turbina, así como la velocidad del grupo y el tipo de alternador.

A continuación se indica dicha clasificación:

2.3.2.1 Centrales de Saltos de Pequeña Altura.

Dentro de este grupo están aquellas centrales cuya altura de salto es inferior a 20 m. Dentro de esta zona normalmente se utilizan las turbinas Francis extra rápidas, las turbinas de hélice y sobre todo las turbinas Kaplan.

2.3.2.2 Centrales de Saltos de Mediana Altura.

Dentro de este grupo están aquellas centrales cuya altura de salto esta entre los 20 y 200 m. Dentro de esta zona normalmente se utilizan las turbinas Francis medias y rápidas, correspondiendo estas últimas a los saltos de menor altura, dentro de los límites indicados.

2.3.2.3 Centrales de Saltos de Gran Altura.

Dentro de este grupo están aquellas centrales cuya altura de salto es superior a 200 m. Dentro de esta zona normalmente se utilizan las turbinas Pelton, o para los saltos de menor altura, turbinas Francis lentas.

2.4 DISPOSICION GENERAL DE UNA CENTRAL HIDRAULICA

Ya hemos dicho que para la formación de un salto de agua es preciso elevar el nivel superficial de esta sobre el nivel normal de la corriente, atajando el agua con una presa para producir el salto total utilizable, en la misma presa, o contribuir a este salto, derivando a la vez las aguas por un canal de derivación de menor pendiente que el cauce del río. Las aguas del canal de derivación hay que conducir las a las turbinas y, para ello, en los saltos menores de unos 12 m, el agua desemboca directamente en la cámara de turbinas y, en los saltos superiores a 12 m, termina en un ensanchamiento llamado cámara de presión desde donde parte la tubería a presión que en conducción forzada, lleva el agua a las turbinas. A la salida de las turbinas, el agua pasa a un canal de desagüe por el que desemboca nuevamente en el río. Esto en términos generales; pero existen numerosas variantes de esta disposición, de las que vamos a estudiar a continuación las más utilizadas en la práctica:

Tabla 2. 1 Características de las Centrales según la Altura de Salto.

<i>Característica</i>	<i>Salto de pequeña altura</i>	<i>Salto de mediana altura</i>	<i>Salto de gran altura</i>
Topografía	Terreno llano o ligeramente ondulado	Terreno suavemente ondulado	Terreno montañoso (a veces suavemente ondulado)
Importancia del caudal con respecto a la altura	Grande	Media	Pequeña
Embalse	Sin embalse o con reserva diaria; presa a través del río; compuertas móviles	Presa y reserva diaria o semanal en el mismo río; compuertas móviles y aliviaderos fijos; a veces embalse	Embalse anual o hiperanual
Llegada de agua a la central	Central de agua fluyente (a veces canal de derivación)	Canal de derivación (a veces central de agua fluyente)	Canal de derivación o túnel y central de pie de presa
Tipo de central	Canal de llegada sala de máquinas subestructura	Canal de llegada tubería forzada sala de máquinas subestructura	Chimenea de equilibrio tubería forzada sala de máquinas subestructura
Tipo de turbina	Kaplan, hélice, bulbo, Francis expés	Francis normal (a veces modernamente también Kaplan)	Francis lenta, Pelton (a veces modernamente también Kaplan)
Tamaño de turbina	Turbinas grandes	Turbinas medianas	Turbinas pequeñas
Eje de la turbina	Corrientemente eje vertical		Corrientemente eje horizontal
Coste de la central/kW instalado	Alto	Medio	Bajo

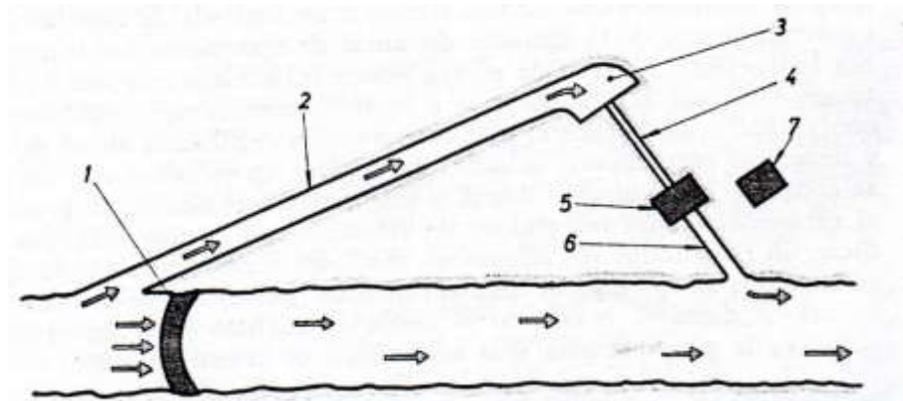
Fuente: Mataix. (2004). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. México: Alfaomega

- **Primera Disposición.** La disposición más compleja está indicada en la figura 2.10 y consta de todos los elementos citados en el párrafo anterior, es decir:

1. Presa
2. Canal de derivación
3. Cámara de presión
4. Tubería de presión
5. Central
6. Tubería de desagüe
7. Parque de distribución a alta tensión

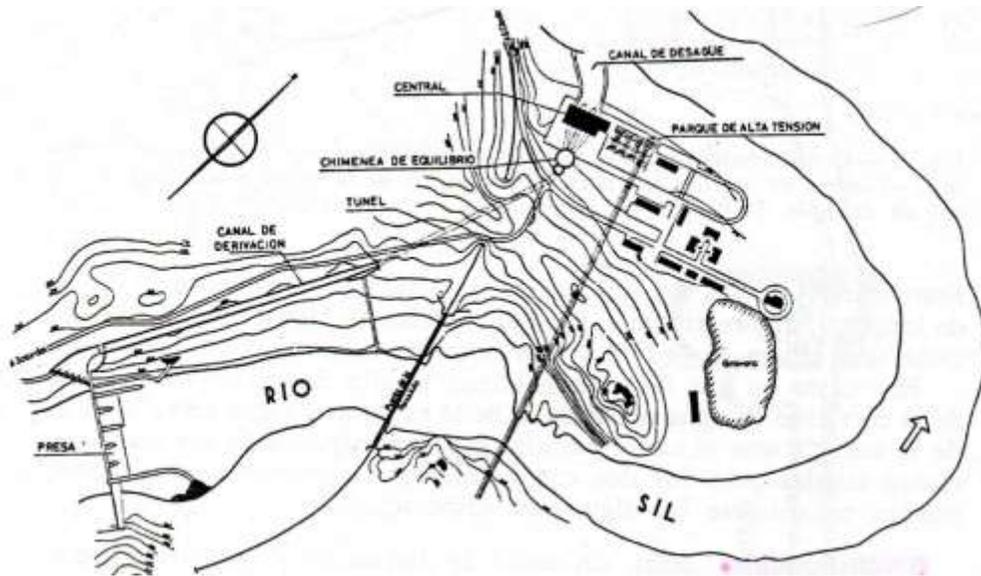
Este tipo de central hidráulica puede ser de agua corriente o de agua embalsada. En este último caso, la presa debe estar proyectada para resistir mayores presiones, ya que el empuje del agua es mucho mayor.

Figura 2. 10 Primera disposición de una central hidroeléctrica



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

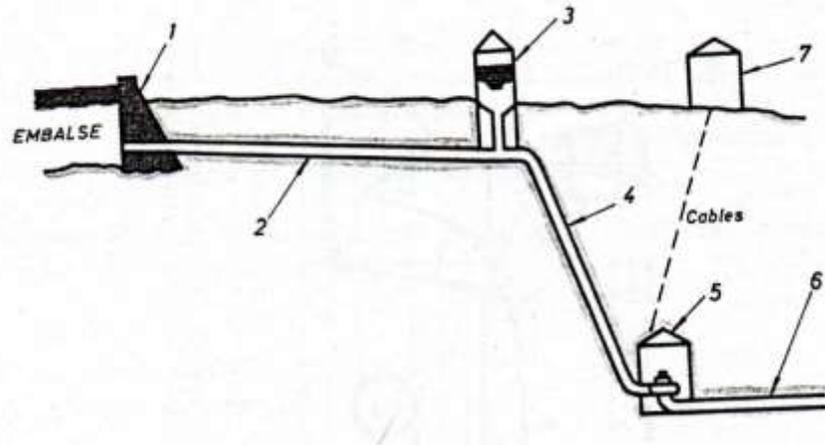
Figura 2. 11 Ejemplo de la primera disposición de una central hidroeléctrica



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

- **Segunda disposición.** Pero, dentro de las ideas actuales de máximo aprovechamiento del agua que en toda época del año lleva corriente, la mejor disposición parece ser la indicada en la figura 2.12 y que está constituida por los siguientes elementos:
 1. Presa para embalsar las aguas en épocas de abundancia y regularizar la corriente
 2. Galería de presión derivada directamente de la presa a nivel inferior al máximo admisible, permitiendo aprovechar todo el volumen de agua almacenada entre un nivel próximo al de la toma y el nivel máximo del embalse.
 3. Chimenea de equilibrio
 4. Tubería de presión
 5. Central
 6. Canal de desagüe
 7. Parque de distribución a alta tensión

Figura 2. 12 Segunda disposición de una central hidroeléctrica



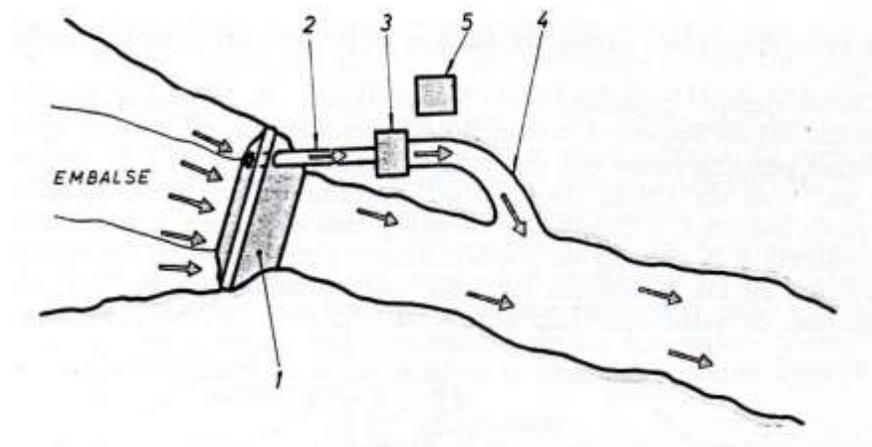
Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

En esta disposición, se sustituye la cámara de presión anteriormente citada, por la chimenea de equilibrio que, como veremos más adelante, sirve para amortiguar los golpes de ariete que se originan por la aceleración o deceleración del agua en la tubería como consecuencia de las variaciones de carga en las turbinas y, además, por proporcionar a dichas turbinas en los primeros segundos de demanda rápida de caudal, el necesario hasta lograrse el régimen normal.

- **Tercera disposición.** Salto sin canal de derivación y constituido, por lo tanto, tal como se indica en la figura 2.13, es decir por los siguientes elementos:
 1. Presa
 2. Tubería de presión, que parte directamente de la presa
 3. Central

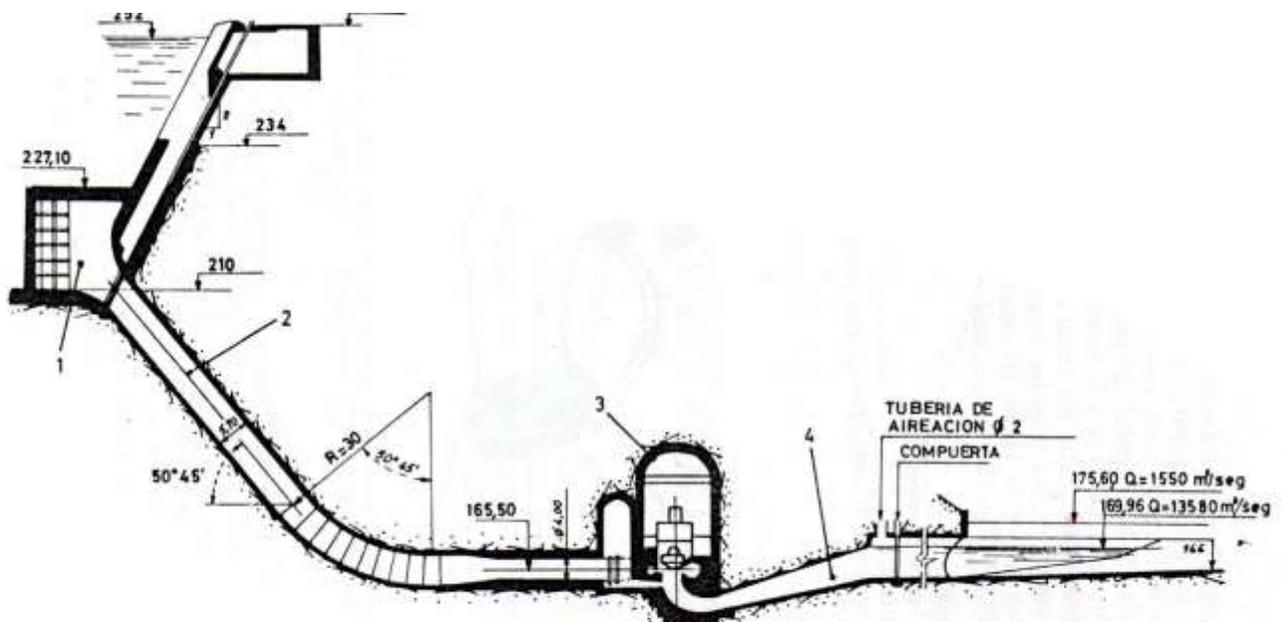
4. Canal de desfogue
5. Parque de distribución a alta tensión

Figura 2. 13 Tercera disposición de una central hidroeléctrica



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

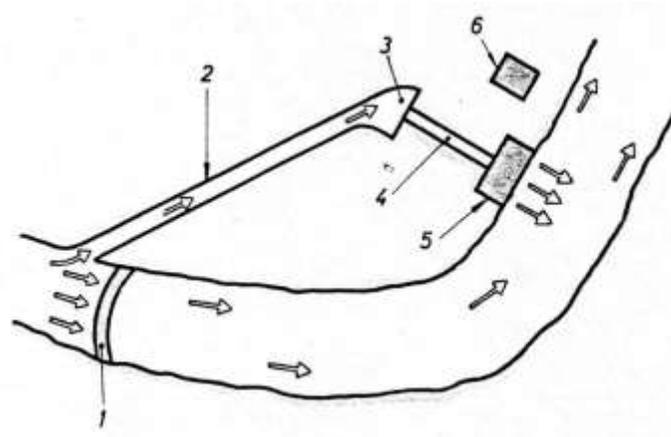
Figura 2. 14 Ejemplo de 3º Disposición de una central hidroeléctrica



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

- **Cuarta disposición.** Salto sin canal de desagüe, tal como se indica en la figura 2.15, y constituido por los siguientes elementos:
 1. Presa
 2. Canal de derivación
 3. Cámara de presión
 4. Tubería de presión
 5. Central
 6. Parque de distribución a alta tensión

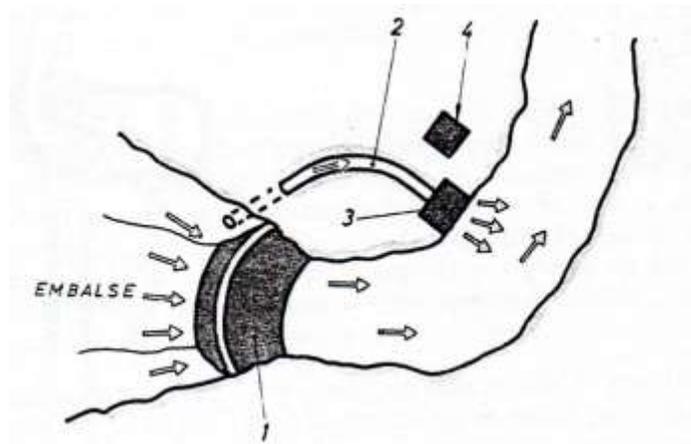
Figura 2. 15 Cuarta disposición de una central hidroeléctrica



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

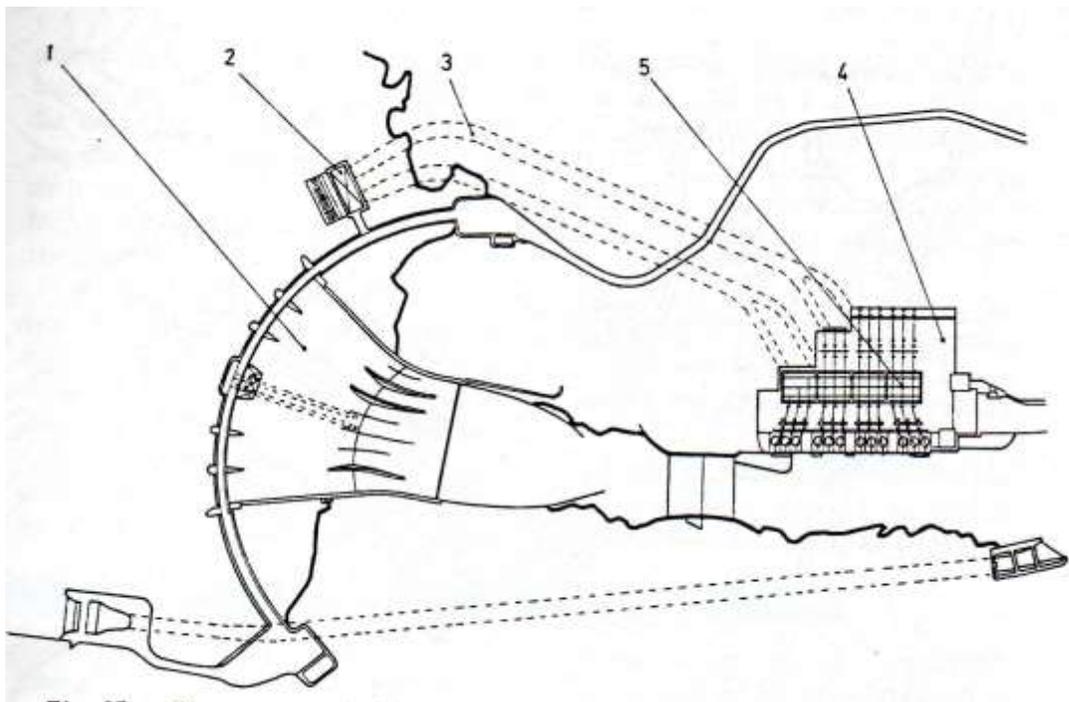
- **Quinta disposición.** Salto sin canal de derivación ni canal de desagüe.
 En estas centrales, las tuberías forzadas parten directamente del pie de la presa y, por lo tanto, tal como se representa en la figura 2.16 consta de los siguientes elementos:
 1. Presa
 2. Tubería de presión
 3. Central
 4. Parque de distribución a alta tensión

Figura 2. 16 Quinta disposición de una central hidroeléctrica



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

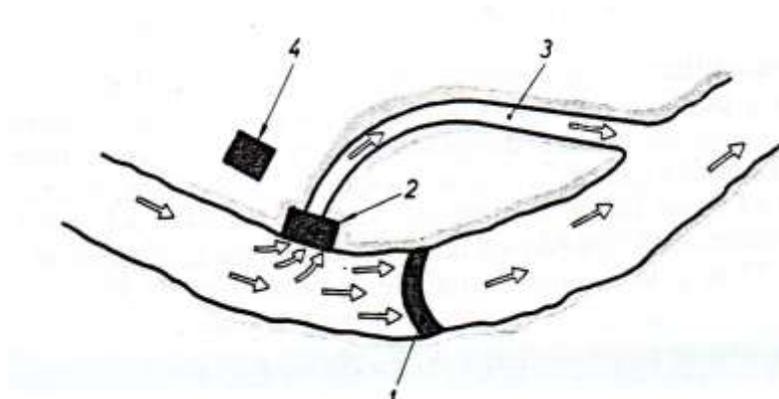
Figura 2. 17 Ejemplo de la quinta disposición de una central hidroeléctrica



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

- **Sexta disposición.** En esta disposición se suprimen los canales de derivación y las tuberías de presión; este caso es muy frecuente en saltos de pequeña altura, determinados solo por la presa. De acuerdo con la figura 2.18, una instalación de este tipo consta de los siguientes elementos:
 1. Presa
 2. Central
 3. Canal de desagüe
 4. Parque de distribución de alta tensión

Figura 2. 18 Sexta disposición de una central hidroeléctrica

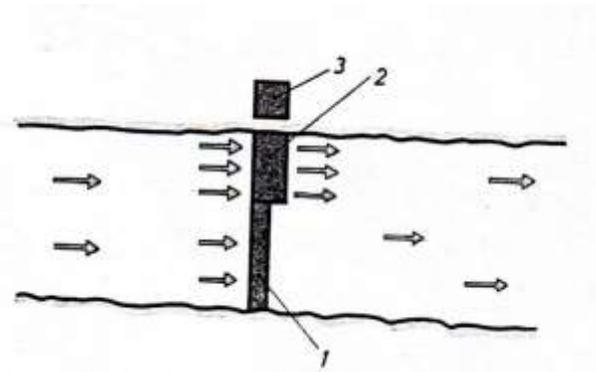


Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

- **Séptima disposición.** Se denomina centrales de pie de presa. Tal como puede apreciarse en la figura 2.19, no hay canal de derivación, ni tubería de presión ni canal de desagüe, lo que simplifica extraordinariamente la construcción de la central que está construida directamente formando conjunto con la presa. Por lo general, se trata de centrales de agua corriente, para pequeños saltos. De acuerdo a la figura 2.19, los elementos constitutivos de este tipo, son los siguientes:

1. Presa
2. Central
3. Parque de distribución a alta tensión

Figura 2. 19 Séptima disposición de una central hidroeléctrica



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

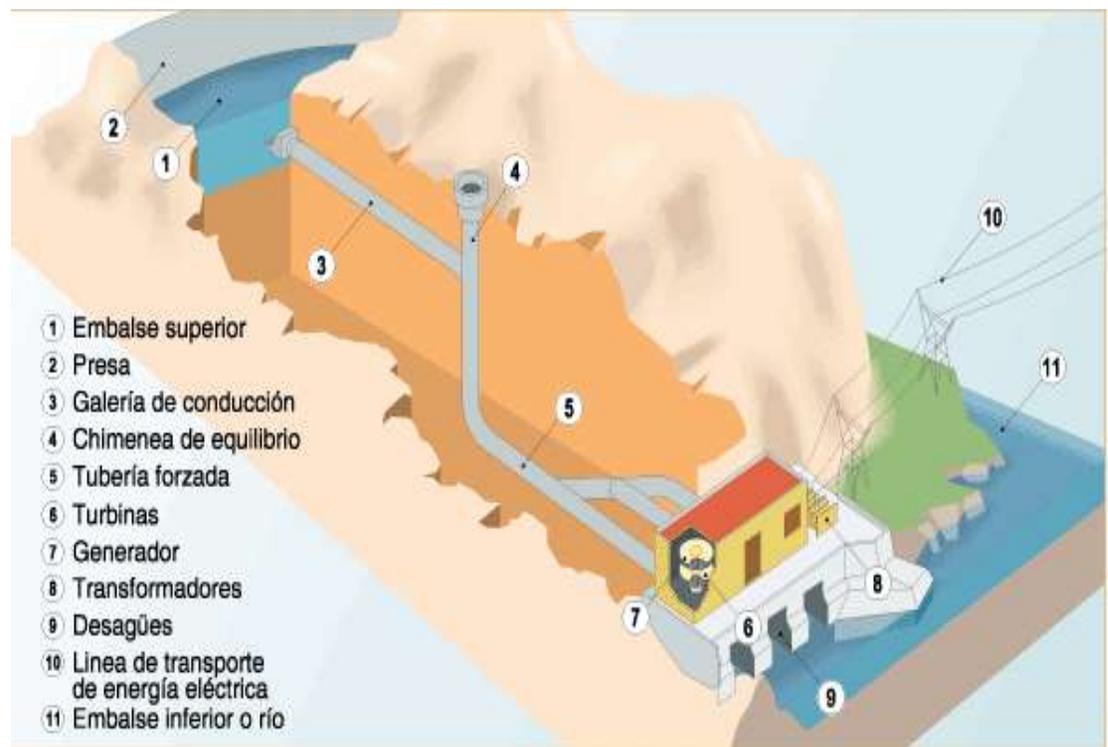
2.5 ELEMENTOS DE UNA CENTRAL HIDRAULICA

En una obra de aprovechamiento hidráulico se desposee al agua, como ya se dijo, de su energía, que se transforma por regla general en energía eléctrica. Esta transformación se realiza en las máquinas instaladas en la llamada casa de máquinas; a ellas se conduce el agua con un mínimo de pérdidas de energía. Toda la obra consiste en general en una presa con una torna para la derivación del caudal, un conducto para el caudal tomado, una antecámara donde se reparte el agua a los grupos de máquinas, la casa de máquinas y el canal de desfogue. Además de estos elementos principales se necesita una serie de otras instalaciones destinadas a la corrección del estado del agua (rejas y desarenadores), a la protección de la galería de presión contra las sobrepresiones excesivas (chimeneas de equilibrio) y a la protección contra inundaciones (aliviaderos). De estas obras se construyen solamente las imprescindibles con arreglo al tipo de central y a sus condiciones especiales.

A continuación, detallaremos los elementos constructivos más comunes, que constituyen una central hidroeléctrica:

- Presa
- Canal
- Galería de Presión
- Cámara de Presión
- Chimenea de equilibrio
- Tubería de Presión (Tubería Forzada)
- Casa de Maquinas
- Canal de Desfogue

Figura 2. 20 Elementos de una central hidroeléctrica



2.5.1 PRESA

El primer elemento que encontramos en una central hidroeléctrica es la presa o azud, que se encarga de atajar el río y remansar las aguas.

Se llama presa, en general, a una construcción que se levanta en el lecho del río para atajar el agua, produciendo una elevación de su nivel que permite la derivación de ella, o bien para almacenar el agua regulando el caudal del río.

Por el objeto para que están construidas, las presas se dividen en dos grandes grupos:

- a) Presas de derivación
- b) Presas de embalse

2.5.1.1 Las presas de derivación

Llamadas también azudes y presas de vertedero están dispuestas, preferentemente, para elevar el nivel del agua, contribuyendo a crear el salto y siendo efecto secundario el almacenamiento del agua cuando lo requieran las necesidades de consumo. Normalmente, están dispuestas para que el agua vierta por encima de ellas mediante vertederos denominados también aliviaderos de coronación.

2.5.1.2 Las presas de embalse

Por el contrario, el objeto preferente de las presas de embalse es el almacenamiento de agua para regularizar el caudal del río, siendo de efecto secundario la elevación del nivel del agua para producir altura de salto. Por lo general, no están dispuestas para que las aguas viertan por encima, sino que tienen construcciones laterales, denominadas aliviaderos de superficie que sirve para devolver el agua excedente al cauce aguas abajo de la presa, cuando se ha llenado el embalse.

En realidad, las presas tienen casi siempre una función mixta; pero se denominarán presas de derivación, o, en su caso, presas de embalse si el efecto predominante es la elevación del nivel de agua para su derivación, o, por el contrario, el embalse del agua para tener siempre un caudal disponible.

2.5.1.3 Clasificación de la presas

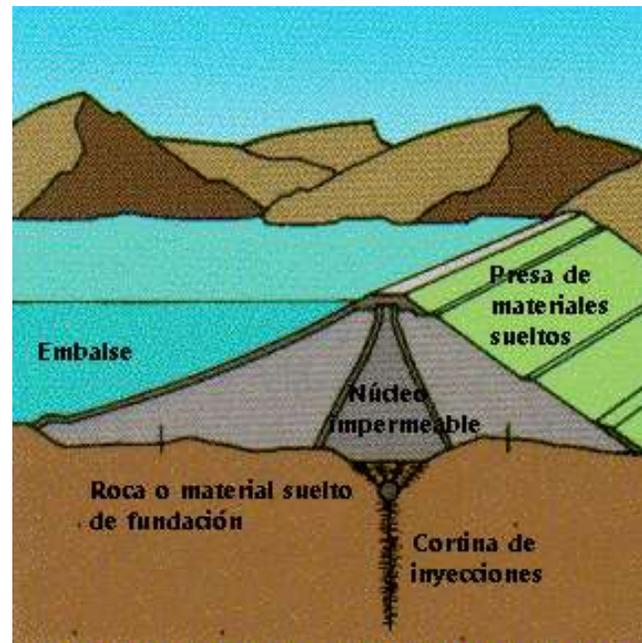
Los mismos criterios de clasificación son válidos para las presas de derivación y para las presas de embalse. Solamente hay que tener en cuenta, que estas últimas son de construcción más robusta debido a que tienen que soportar mayores presiones del agua. Por lo general las presas de embalse son de mayor altura.

Desde punto de vista del material empleado en su construcción, tenemos una variedad de tipos, en este trabajo citaremos las más comunes utilizadas para aprovechamientos hidroeléctricos:

- **Presas de tierra y escollera.** Generalmente, para aprovechamientos hidroeléctricos no se utilizan la presas de tierra ni las presas de escollera propiamente dichas, sino más bien las presas mixtas constituidas por tierra, escollera y una capa impermeabilizada situada generalmente en el paramento de aguas arriba.

La escollera constituye el macizo estabilizador de la presa. La capa impermeabilizadora está constituida generalmente por una pantalla de hormigón en masa o armado situada, como hemos dicho, en el paramento aguas arriba o, en otros casos, situada en la parte central del macizo. Otras veces se emplea la arcilla apisonada.

Figura 2. 21 Esquema de una presa de tierra y escollera



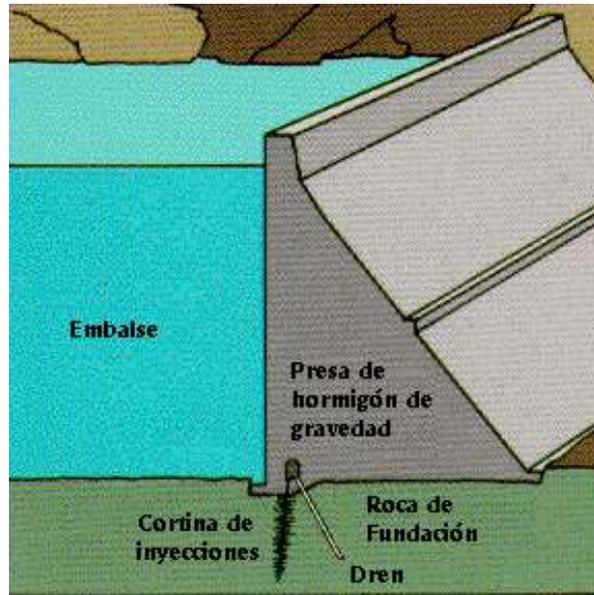
- **Presas de Concreto.** Son las más frecuentemente empleadas en los aprovechamientos hidroeléctricos, ya sea como presas de derivación ya sea como presas de embalse.

Estas presas requieren una cimentación sobre roca sana, resistente e impermeable; la falta de alguna de estas circunstancias, o el precio de su coste, superior en muchos casos al de otros tipos de presas, es lo que determina la elección de otra clase de presas; para alturas inferiores a unos 40 m suelen resultar más económicas las presas de tierra y escollera pero, para mayores alturas, las presas de hormigón pueden resultar más económicas debido a que los taludes que hay que dar a las presas de tierra y escollera, aumentan mucho su volumen y, por lo tanto, su precio.

Los tipos más comunes en presas de hormigón son los siguientes:

- a) Presas de gravedad

Figura 2. 22 Esquema de presa de gravedad



En las presas de gravedad los esfuerzos a que se hallan sometidos debidos, sobre todo, a la presión del agua sobre el paramento de aguas arriba se resisten por el peso propio de la presa.

b) Presas de arco sencillo

Figura 2. 23 Esquema de presa de arco sencillo



En las presas de arco sencillo, por las circunstancias especiales del perfil transversal del cauce donde están situadas y por la planta curva de la presa, resisten como si fuera una bóveda, transmitiendo las cargas a los estribos; también se las llama presas de bóveda sencilla. Dadas las características especiales de estas presas, los estribos habrán de ser especialmente robustos, cimentados además sobre roca dura. Por lo general, se instalan en gargantas estrechas y de gran altura.

2.5.2 CONDUCCION DEL AGUA

La conducción tiene por objeto llevar el agua desde la toma hasta las turbinas y desde éstas nuevamente al río; este cometido debe conseguirse de la manera más económica, es decir, con pérdidas de carga y de caudal lo más pequeñas posible y con el mínimo de gasto para su construcción. Teniendo en cuenta estas condiciones se escoge la sección más económica, que sirve de base para la construcción. La elección de las dimensiones de la conducción exige mucho cuidado, dadas las grandes secciones y longitudes que actualmente son necesarias en las importantes centrales modernas, porque teniendo en cuenta los grandes movimientos de tierra y la necesidad de enormes cantidades de materiales, un pequeño ahorro en cada metro de longitud representa una disminución notable de los costes de construcción.

Las conducciones se pueden clasificar desde diferentes puntos de vista; para la descripción de su cálculo y ejecución lo más ventajoso es la clasificación en:

1. Canales,
2. Tuberías, y
3. Galerías.

En una obra de aprovechamiento hidráulico con derivación lateral, por regla general se utilizan, según las condiciones del terreno, varios de los tipos mencionados. Si la situación de la toma y la de la central están ya fijadas, el trazado resulta también

determinado dentro de límites estrechos. Si hay varios trazados posibles, la decisión es el resultado de una comparación económica; pero en un estudio de esta clase hay que considerar también circunstancias que no se pueden expresar numéricamente, como por ejemplo el peligro de los aludes, de deslizamientos y de desprendimientos de rocas, y en especial todas las circunstancias que pueden afectar a la seguridad de la explotación.

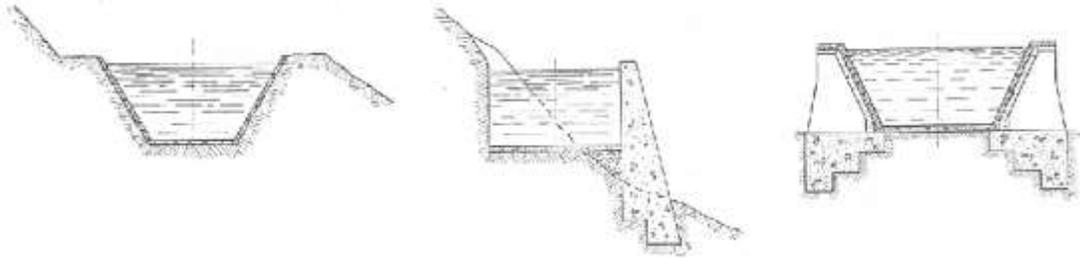
2.5.2.1 Canales de derivación

Todas las conducciones construidas a cielo abierto se llaman canales. Los canales se utilizan frecuentemente cuando dentro del proyecto se utiliza una presa de derivación, para captar el agua que luego será conducida por el canal hacia las turbinas de la central.

Ahora, cuando el rango del salto bruto es inferior a los 10 a 20 m, basta con un canal sin carga de presión (o sea, no es necesario las tuberías forzadas) para llevar el agua a las turbinas; para este caso, las turbinas se montan en una cámara de obra de fábrica (turbinas de cámara abierta), es decir que debe disponerse un ensanchamiento del canal para enlazar con la entrada a las turbinas, que se denomina antecámara de turbinas.

Por lo general, y para evitar filtraciones en el terreno, los canales están revestidos interiormente de mampostería, hormigón en más u hormigón armado. Los canales pueden realizarse *en desmonte*, es decir excavando el terreno (fig.2.24), solución que es la más segura a efectos de la estabilidad y de la aminoración de filtraciones; también pueden ser a *media ladera* (fig 2.24), o sea excavando la ladera por un lado y disponiendo un terraplén al otro lado y, finalmente *en terraplén*, es decir, con obra de fábrica a ambos lados, solución a la cual se recurre solo excepcionalmente porque es la más costosa y porque, para que la estabilidad tenga las debidas condiciones, debe consolidarse por medio de contrafuertes, cimientos, etc.

Figura 2. 24 Esquema de canales



Fuente: Schoklitsch. (1987). Tratado de arquitectura hidrulica. Barcelona, Espana:Gustavo Gili

Si la situación de la toma y la central están fijadas, el trazado del canal queda ya determinado, como se dijo antes, dentro de límites estrechos y claro está que la solución deberá procurar conducir el agua por el trayecto más corto, el cual nos asegura una menor pérdida de salto.

En resumen podemos mencionar, al final de la derivación, el agua se encuentra con la energía potencial correspondiente a su desnivel hasta el río. Por lo tanto, es necesaria una disposición para aprovechar esta energía en las turbinas.

Si el salto es bajo, inferior a unos 15 m, las turbinas se montan en una cámara de obra de fábrica (turbinas de cámara abierta). Si el salto es superior a los 15 m, hay que llevar el agua a las turbinas en conductos a presión.

Es decir, que debe disponer un ensanchamiento del canal para enlazar con la entrada a las turbinas, que se denomina antecámara de turbinas, o en el segundo caso expuesto, para enlazar con la tubería de presión, llamándose entonces cámara de carga.

2.5.2.2 Tuberías de presión

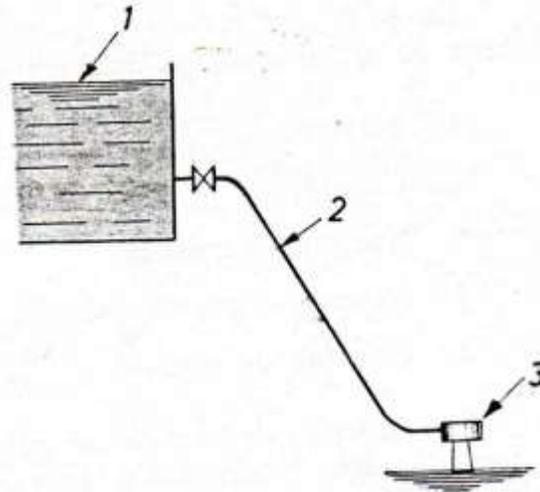
Cuando el salto bruto es de orden superior a los 10 a 20 m, el agua es conducida a las turbinas por tuberías forzadas o también llamadas tuberías de presión. Como los materiales más empleados para tuberías forzadas tenemos el acero y el hormigón armado.

Las tuberías forzadas se colocan al aire libre, simplemente apoyadas en soportes (colocación a cielo abierto), o se colocan en el terreno y luego se recubren (tuberías cubiertas o enterradas).

Las tuberías colocadas a cielo abierto sobre apoyos aislados requieren anclajes en puntos fijos. En las tuberías discontinuas, entre cada dos puntos fijos el eje se dispone según una recta y se intercalan unas piezas de dilatación que permiten las variaciones de longitud. Si se prescinde de las piezas de dilatación, la tubería ejerce entonces, al impedirle las variaciones de longitud, presiones notables sobre los puntos fijos, que han de soportar grandes esfuerzos.

En las instalaciones hidroeléctricas, las tuberías de presión o tuberías forzadas, tienen por objeto conducir el agua desde la cámara de presión a las turbinas cuando, por causa de la altura del salto, se precisa tal disposición para transformar la energía potencial de posición que tiene el agua en la cámara de presión, en energía potencial de presión que tiene junto a la turbina y al final de la conducción forzada.

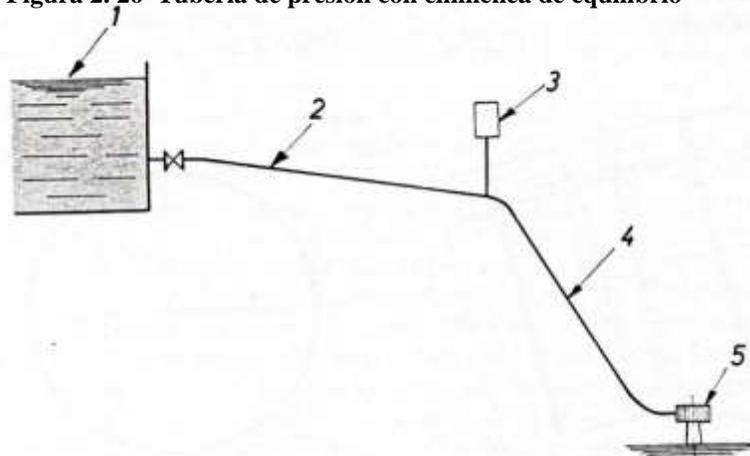
Figura 2. 25 Esquema de Tubería Forzada



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

Unas veces, tal como se representa en la figura 2.26, la tubería de presión 2 es completamente cerrada y se dirige directamente de la cámara de presión a la turbina. En otras ocasiones, como se muestra en la figura 2.26, se dispone un primer tramo de tubería de presión 2, con escasa pendiente, hasta la chimenea de equilibrio 3. A partir de esta sigue un segundo tramo 4, de pendiente mucho más pronunciada, que une la chimenea de equilibrio con la turbina.

Figura 2. 26 Tubería de presión con chimenea de equilibrio



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

La primera disposición se adopta cuando la unión de la cámara de presión o del embalse origen de la tubería forzada puede hacerse mediante una línea de gran pendiente y longitud relativamente pequeña. La segunda disposición se utiliza cuando la cámara de presión o en el embalse regulador, quedan muy alejadas de las turbinas. En este caso, la unión directa de ambos elementos por medio de una tubería forzada haría que esta quedara expuesta a las sobre presiones provocadas por los golpes de ariete, lo que obligaría a darle una resistencia que resultaría antieconómica. Además, al ser la tubería de gran longitud, tardaría cierto tiempo en acelerarse o desacelerarse el agua como consecuencia de las variaciones de carga en las turbinas. La instalación de una chimenea de equilibrio, entre los dos tramos de la tubería forzada, tal como se indica en la figura xx, hace que los golpes de ariete queden casi anulados en dicha chimenea, en cuyo caso, para resistir estos golpes de ariete basta con que en el segundo tramo sea suficientemente resistente; este segundo tramo es, por lo tanto, la tubería de presión propiamente dicha.

2.5.2.3 Galerías

Galerías conducen el agua a través de una montaña, o a lo largo de la pendiente del terreno cuando ésta es muy pronunciada y no se puede construir un canal o tubería. Si incluso la clave de la galería queda mojada por el agua que circula por ella, se dice que la galería es de presión; si el agua fluye a lo largo de la galería presentando una superficie libre, se dice que es una galería de pendiente natural.

En **Galerías de Pendiente Natural**, el agua fluye como en un canal con superficie libre.

Para la toma de agua de un embalse, las **galerías de presión** ofrecen evidentes ventajas frente a las galerías de pendiente natural, tanto desde el

punto de vista hidráulico como desde el de la explotación; por esto se tiende siempre a la construcción de esta clase de galerías.

En una galería de presión el revestimiento tiene que resistir no solamente la presión del terreno, sino que también la presión del agua desde su interior. Solo raras veces ocurre que se puede dejar sin revestimiento una galería de presión, pues tiene que ser perfectamente impermeable; su construcción solamente se puede recomendar solamente en terrenos de roca, que no son propensos a deslizamientos. Tanto la forma de la sección transversal como el revestimiento tienen que proyectarse de modo que no se puedan producirse grietas.

Como forma de la sección transversal para las galerías de presión se puede emplear solamente la circular. Toda otra forma sufre deformaciones cuando se llena con agua a presión, tanto más, cuanto más deformable es el terreno. El revestimiento de una sección no circular, además de tracción, sufre también flexiones que tienden a deformar la sección, pues esta trata de aproximarse más a la forma circular. Estas deformaciones tienden por consecuencia la formación de grietas longitudinales en el revestimiento.

El revestimiento de las galerías de presión circulares se oprime, por la acción del agua, contra el terreno y éste soporta parte de la presión. Cuanto más resistente sea la roca tanto mayor será la parte del empuje del agua que se transmite a ella.

2.5.3 CAMARA DE PRESION

La cámara de presión o tanque de carga, sirve como vaso regulador, almacenando temporalmente agua cuando se reduce la carga sobre la planta y proporcionando agua para los incrementos iniciales de una carga mayor, conforme el agua va siendo acelerada.

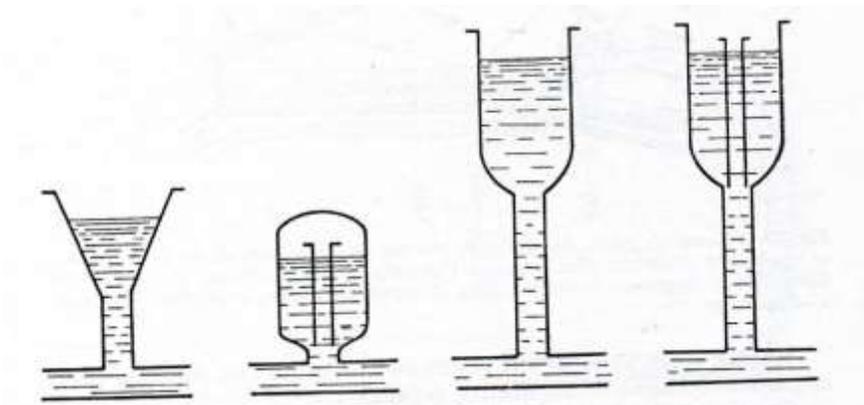
2.5.4 CHIMENEA DE EQUILIBRIO

Una chimenea de equilibrio es, en esencia, un pozo vertical o inclinado, abierto por la parte superior situado en el trayecto de la tubería la más cerca posible de la turbinas. Cuando se produce un golpe de ariete positivo en la tubería junto a la turbina, encuentra menos resistencia a vencer en la chimenea y actúa sobre el agua de esta, elevando su nivel, produciéndose una deceleración del agua en la tubería.

Por el contrario, cuando se produce un golpe de ariete negativo, baja el nivel de agua en la chimenea, originándose una aceleración del agua en la tubería. Es decir, que la chimenea de equilibrio actúa como un muelle mecánico, evitando las variaciones bruscas de presión, o como un condensador en un circuito eléctrico, que impide las variaciones bruscas de tensión en dicho circuito.

En la figura 2.27, se muestran distintas disposiciones de chimeneas de equilibrio.

Figura 2. 27 Diferentes disposiciones de chimeneas de equilibrio



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

2.5.5 CASA DE MAQUINAS

En la casa de máquinas de una central hidroeléctrica, se montan los grupos eléctricos para la producción de la energía eléctrica, así como la maquinaria auxiliar necesaria para su funcionamiento. Como puede comprenderse, las disposiciones adoptadas para las casas de máquinas, son variadísimas y dependen de las circunstancias y condiciones del aprovechamiento hidroeléctrico. Sin embargo, podemos intentar una primera clasificación de las centrales según la disposición general de la casa de máquinas en:

- Centrales al exterior
- Centrales subterráneas

2.5.5.1 Centrales al exterior

Las centrales al exterior constan, esencialmente de una nave donde se instalan los grupos generadores y de uno o varios edificios adosados o anejos para la instalación de los transformadores, maquinaria auxiliar y aparatos de corte, protección y seguridad. Los edificios correspondientes se construyen, casi siempre, de hormigón en masa o armado, y a veces, de mampostería, piedra y ladrillo. Conviene que estas centrales estén lo más cerca posible del punto en que las aguas derivadas tengan que reingresar en el río aunque, debido a las condiciones del terreno, y a otras circunstancias, esto no sea siempre posible.

En saltos obtenidos exclusivamente con las presas de embalse, lo más corriente es situar la casa de máquinas cerca de la presa y hacer la toma de agua desde esta por tubería y a nivel suficientemente inferior al máximo del embalse, con el objeto de aprovechar el caudal almacenado en el para regular el consumo de energía de la central. Muchas veces el edificio de la central forma conjunto con la presa y entonces se denomina centrales de pie de presa.

2.5.5.2 Centrales subterráneas

En las centrales subterráneas, llamadas también centrales en caverna, no existen edificios al exterior; la casa de máquinas está excavada en el interior de la montaña o bajo el lecho del río. Por lo general, el parque de distribución está situado al exterior, y los cables procedentes de la central se instalan en pozos especiales en los que generalmente, se disponen también escaleras, ascensores, etc... para uso del personal de servicio. Además, deben proveerse los correspondientes accesos, generalmente en forma de túneles, para el montaje y repuesto de la maquinaria de la central. Las razones que pueden aconsejar la instalación de una central subterránea son varias, generalmente de orden económico.

Una de las mayores ventajas de la central subterránea es que puede situarse en el sitio que previamente ha sido elegido como el más conveniente dadas las características del salto; la central subterránea permite disponer la tubería y las chimeneas de equilibrio en el interior de la roca, haciendo trabajar a esta, descargando en parte el trabajo de la tubería que puede, de esta manera, tener menor espesor que si estuviera instalada en el exterior. Las chimeneas de equilibrio y demás dispositivos para disminuir los golpes de ariete, pueden tener dimensiones menores, ya que la tubería forzada es de menor longitud. Además de esto, se pueden enumerar otras ventajas de las centrales en caverna, tales como la disminución del coste de expropiación de los terrenos, el absoluto abrigo contra avenidas de agua en el canal y contra las diferencias de temperatura, etc...

Entre los inconvenientes que presentan las centrales subterráneas podemos mencionar, la dificultad para habilitar grandes espacios para la casa de máquinas. Este inconveniente se puede reducir mediante los grupos turbina- generador, de eje vertical que siempre ocupa menos espacio en la planta; también está la dificultad para el acceso de la maquinaria durante el montaje y reparación y para el acceso del personal de servicio. Por lo general, han de preverse costosas construcciones para estas vías de acceso,

en forma de túneles, pozos, etc... También existe la posibilidad de filtraciones de agua, a través de los pozos de acceso de personal, de las paredes y techo de la central.

2.5.6 CANAL DE DESAGUE

El canal de desagüe llamado también socaz, recoge el agua a la salida de la turbina para devolverla nuevamente al río en el punto conveniente. A la salida de las turbinas, el agua tiene todavía una velocidad importante y, por lo tanto, bastante poder erosivo y para evitar socavaciones de piso o paredes hay que revestir cuidadosamente el desembocadura del agua de las turbinas.

En saltos bajos, en que conviene perder poco desnivel, el canal de desagüe ha de ser corto. En los saltos de gran altura y, especialmente en aquellos en que el agua arrastra poco o ningún material sólido, el canal de desagüe puede ser de mayor longitud.

2.6 TURBINAS HIDRAULICAS

Como mencionamos anteriormente la función de una central hidroeléctrica es utilizar la energía potencial del agua almacenada en un embalse, a una elevación más alta y convertirla, primero en energía mecánica y luego en eléctrica. Este proceso toma en consideración varios factores entre los cuales uno de los más importantes es la caída de agua (head). Este factor es decisivo al momento de escoger el tipo de turbina hidráulica que se instala en la planta.

La turbina hidráulica es la encargada de transformar la energía mecánica en energía eléctrica, por esto es de vital importancia saber elegir la turbina adecuada para cada sistema hidroeléctrico.

2.6.1 CLASIFICACION DE LAS TURBINAS HIDRAULICAS

Las turbinas se pueden clasificar de varias maneras entre las clasificaciones más importantes tenemos:

2.6.1.1 Según la dirección en que entra el agua

- Turbinas axiales: el agua entra en el rodete en la dirección del eje
- Turbinas radiales: el agua entra en sentido radial, no obstante el agua puede salir en cualquier dirección.

2.6.1.2 De acuerdo al modo de obrar del agua

- Turbinas de chorro o de acción simple o directa.
- Turbinas de sobrepresión o de reacción.

2.6.1.3 Según la dirección del eje

- Horizontales.
- Verticales.

Hay otras clasificaciones, según las condiciones de construcción, no obstante la clasificación más importante es la que las separa de acuerdo al modo de obrar el agua, estas son de reacción o de chorro.

Aunque hay muchas turbinas que entran en estas clasificaciones las más importantes son las turbinas Pelton, Francis y Kaplan.

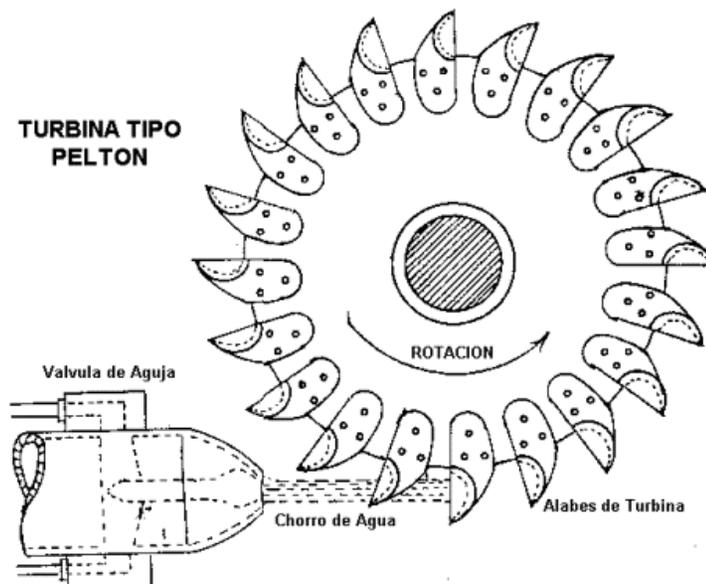
Una caída alta (entre 800 a 2000 pies) requiere una turbina para alta presión, de impulso o tipo Pelton. Si la caída es intermedia (entre 200 y 800 pies), entonces se escoge una turbina de reacción tipo Francis. Para caídas bajas (menores de 200 pies) se utiliza un tipo de turbina de reacción tipo Kaplan.

2.6.2 TURBINAS DE CHORRO

Estas fueron las primeras turbinas que se utilizaron, sin embargo el desarrollo y el empleo de estas turbinas no empieza hasta la mitad del siglo XIX, primero se empleó la denominada rueda tangencial introducida por el ingeniero suizo Zuppinger en 1846, que bajo las formas modificadas de hoy se conoce como rueda Pelton, es importante anotar que son muy eficientes, el rendimiento de las ruedas tangenciales ha llegado hasta 95%.

En la turbina Pelton, el agua tiene una presión muy alta. La válvula de aguja, que se usa para controlar el flujo de agua, deja pasar un chorro de agua que choca con los álabes de la turbina transfiriéndole su energía y haciendo girar la turbina. Esta, a su vez, hace girar un generador que está acoplado al eje de la turbina para producir energía eléctrica, como medida de seguridad se usa una válvula esférica.

Figura 2. 28 Turbina Pelton

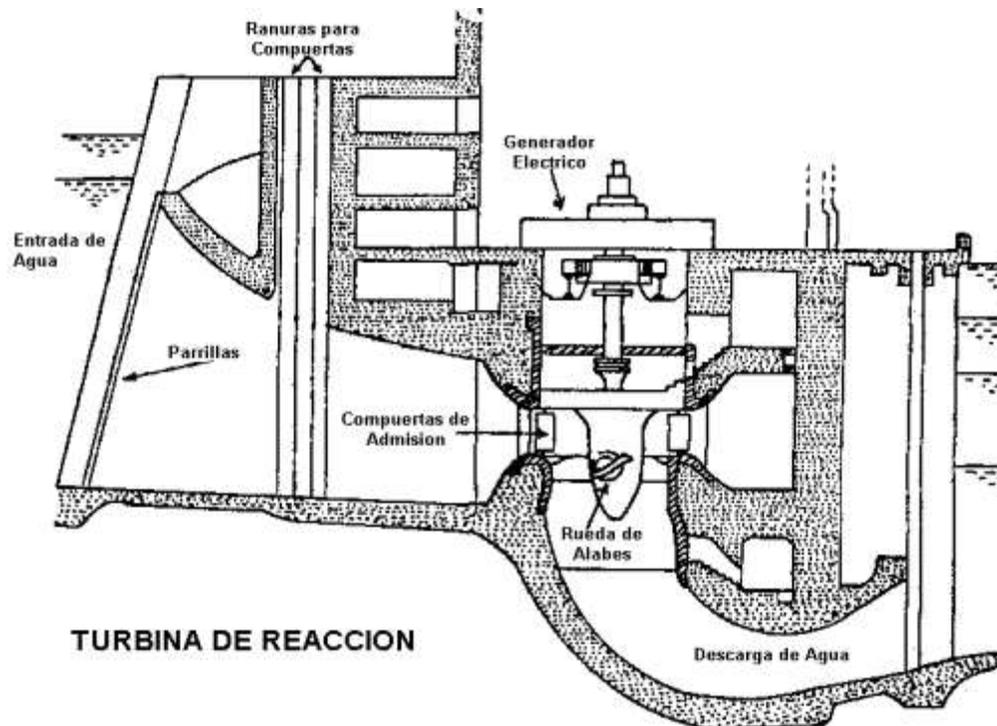


Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

2.6.3 TURBINAS DE REACCION

Las turbinas de reacción son de dos tipos: Francis y Kaplan. En ellas ocurre un proceso similar, excepto que la presión es más baja, la entrada a la turbina ocurre simultáneamente por múltiples compuertas de admisión (wicket gates) dispuestas alrededor de la rueda de álabes (runner) y el trabajo se ejerce sobre todos los álabes simultáneamente para hacer girar la turbina y el generador.

Figura 2. 29 Turbinas de reacción



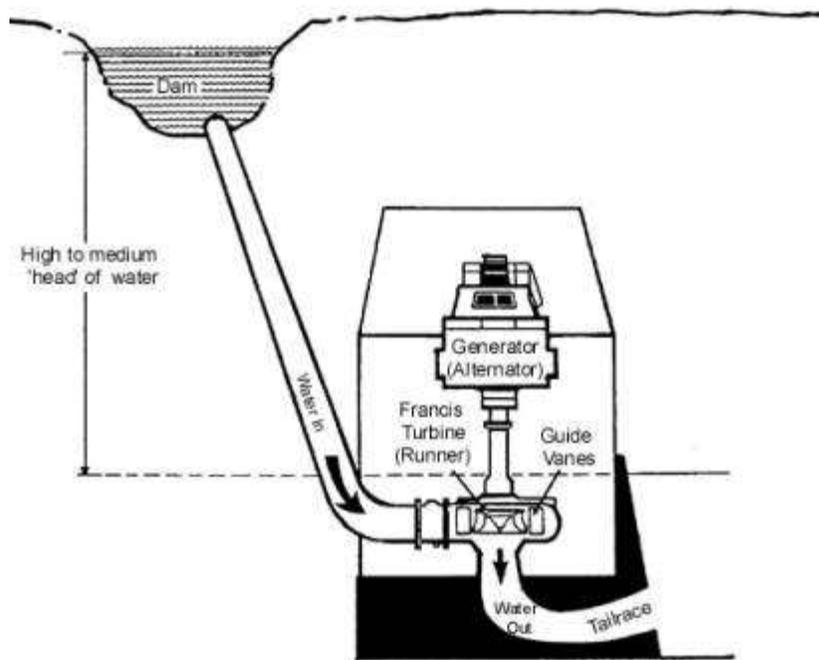
Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

2.6.3.1 Turbinas Francis

Estas turbinas se caracterizan por lo siguiente:

- Están formadas por una espiral que va a alimentar al rodete.
- Se utilizan para caídas medianas.
- Tienen un distribuidor que orienta el agua hacia el rodete.
- A semejanza de una bomba centrífuga.
- El agua no está a la presión atmosférica.
- Descargan a contra presión.
- Generalmente están provistas de una válvula mariposa como medida de prevención.

Figura 2. 30 Turbina Francis



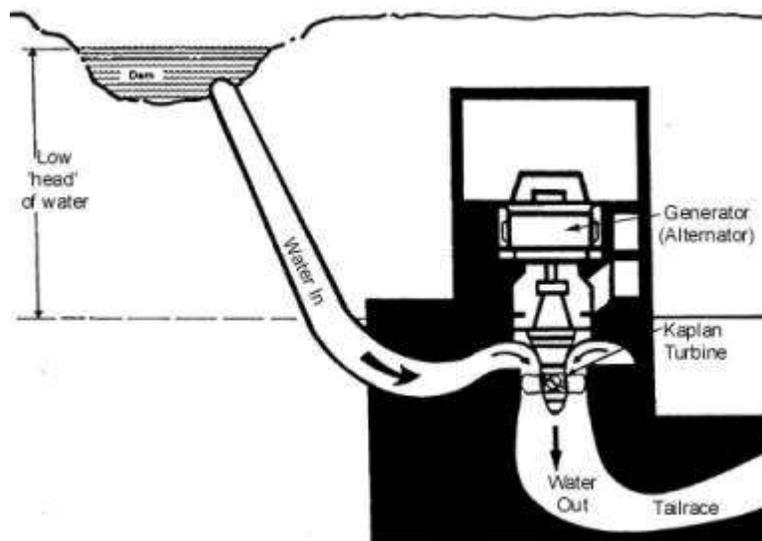
Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

2.6.3.2 Turbinas Kaplan

Esta se caracteriza por lo siguiente:

- Se utilizan para caídas bajas.
- El rodete recuerda la forma de una hélice de barco.
- El ángulo de inclinación de las palas del rodete es regulable.
- Se utilizan para gastos muy grandes.
- La regulación se efectúa por medio de un distribuidor como en las Francis además con el ángulo de inclinación de las palas en el rodete.

Figura 2. 31 Turbina Kaplan



Fuente: Ramirez, Veltran. (1974). Centrales Electricas. Barcelona, Espana:CEAC

2.7 DESCRIPCION GENERAL DEL PROYECTO MULTIPLE SAN JACINTO

El proyecto múltiple San Jacinto tiene varios componentes que se encuentran estrechamente ligados entre sí (Presa-Dique-Central), a saber:

2.7.1 PRESA

La presa de San Jacinto es una bóveda de doble curvatura ubicada en el angosto de San Jacinto. La altura máxima es de 47 m y la longitud de coronamiento es de 100 m.

La cota de coronamiento es de 1887,50. El espesor en clave de 1,80 m en la cresta hasta 6,10 metros en la base, pasando por un espesor máximo de 6,60 metros.

Las obras hidráulicas de la presa comprendieron inicialmente en vertedero libre con umbral calado a la cota 1882,50 de 900 m³/s. de capacidad de evacuación, dos desagües de fondo y dos dispositivos de desenfangamiento. Un revestimiento de protección en el pie aguas abajo de la presa asegura la protección de la roca del río y de las márgenes durante las evacuaciones de las aguas

En el proyecto original, el nivel máximo normal del embalse era 1882,50 y el nivel máximo de crecidas era 1887,50 (T=10.000 años).

Figura 2. 32 Represa San Jacinto



Fuente: Archivos del Proyecto Multiple San Jacinto

El volumen total del embalse a la cota 1882,50 es de 56 hm³ y la superficie correspondiente es de 580 hectáreas. EL volumen útil es de 41 hm³ al principio de la explotación y disminuye hasta 27,50 hm³ después de 50 años de explotación. Esta variación es debido a la acumulación de los aportes sólidos.

Actualmente con la implementación de las presas inflables que se colocaron el nivel máximo normal del embalse es de 1884.

2.7.2 PRESAS INFLABLES

Con el objetivo de poder almacenar mayor cantidad de agua en los periodos de lluvia, en marzo de 1996, se implementaron las presas inflables que tenían una altura de 1,5 metros.

Con esta adición de 1,5 metros en la altura, se incrementaron 8. 442.000 m³ de agua almacenada, en consecuencia el vertedero libre con umbral calado estaría en la cota 1884.

Figura 2. 33 Presas Inflables en periodo seco



Fuente: Archivos del Proyecto Multiple San Jacinto

Figura 2. 34 Presas Inflables en periodo de lluvia



Fuente: Archivos del Proyecto Multiple San Jacinto

2.7.3 EL DIQUE LA TABLADA

El macizo de la Tablada rodea naturalmente el embalse en el lado este, está constituido de sedimentos lacustres cuaternarios más o menos permeables y erosionables.

Fue necesario proteger este macizo, construyendo un dique impermeable de tierra sobre la ladera aguas arriba de la tablada convenientemente reformado.

Figura 2. 35 Dique de La Tablada



Fuente: Archivos del Proyecto Múltiple San Jacinto

El dique la Tablada, tiene un volumen total de 1.683. 000 m³, una altura máxima de 38 m, y una longitud de 2900 m. Este dique comprende aguas arriba a aguas abajo un rip-rap de protección, una capa gravosa de transición, un núcleo inclinado de arcilla compactada y un filtro de material de aluviones.

2.7.4. CENTRAL HIDROELECTRICA

La planta hidroeléctrica está constituida de un edificio principal, de locales técnicos, de una plataforma de acceso, de un edificio anexo para el garaje y taller y de un canal de descarga.

La sala de máquinas tiene 30,25 metros de largo, 14 metros de altura y un ancho de 8,50 metros.

Figura 2. 36 Instalaciones internas de la central hidroeléctrica San Jacinto



Fuente: Elaboracion propia

La potencia máxima instalada es de 8 MW dos grupos de 3.5 MW que comprenden cada uno un alternador de 35 MW y dos turbinas Francis de 7350 KW/4 de potencia con una altura nominal de 51 m.

El circuito hidráulico incluye un toma de agua, una galería de 538 metros de longitud, una chimenea de equilibrio de 37 metros de alto, una galería blindada de

90 metros de longitud, una cámara de válvulas y dos tuberías forzadas de 95 metros de longitud y de 1,60 metros de diámetro

2.8 UBICACIÓN, DISPOSICION GENERAL Y ELEMENTOS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE SAN JACINTO

La central hidroeléctrica de San Jacinto forma parte del Sistema Eléctrico de la ciudad de Tarija, está constituida por dos unidades generadoras, cada una de ellas equipadas con dos turbinas tipo Francis de eje horizontal, con una potencia de 8 MW.

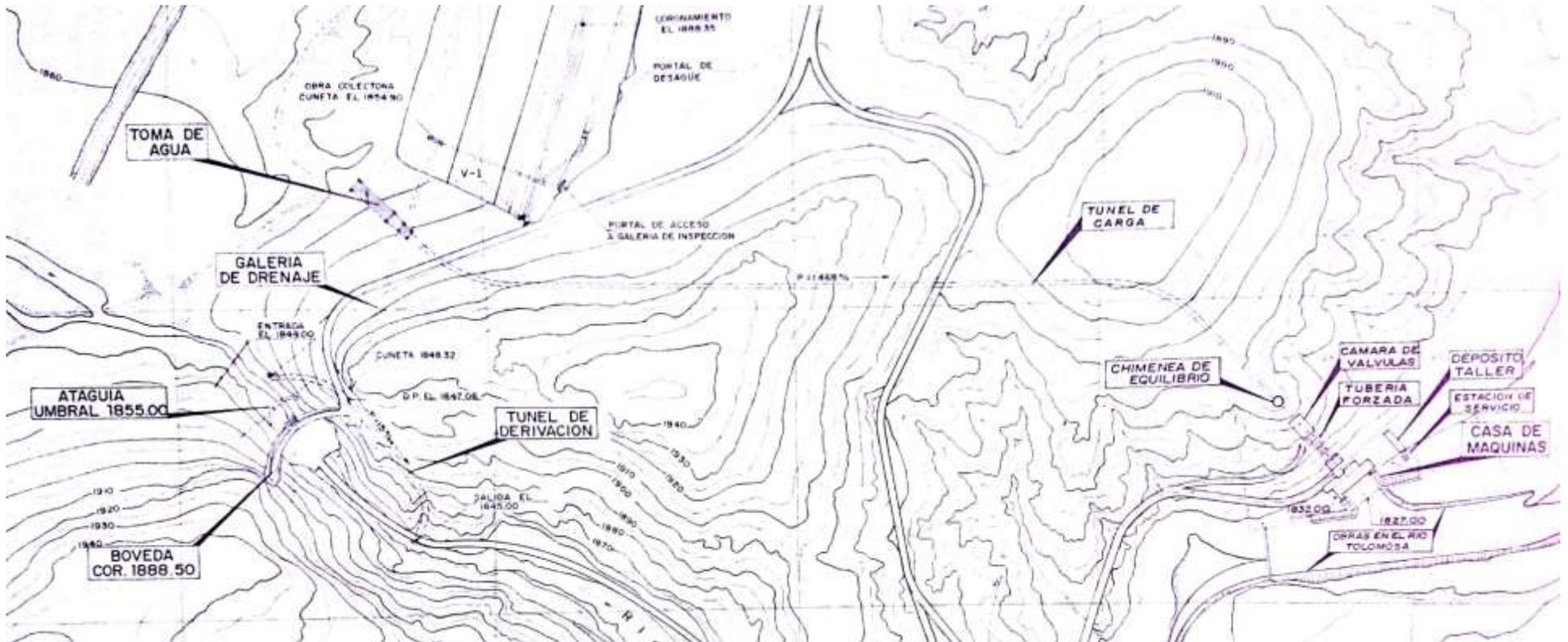
La planta se encuentra ubicada entre los $21^{\circ}35'45''$ de latitud sur y $64^{\circ}43'30''$ de longitud oeste del meridiano de Greenwich a unos 7 kilómetros al sudoeste de la ciudad de Tarija.

El aprovechamiento hidráulico se lo realiza a través de los aportes del río Tolomosa que tiene su origen en la cordillera de Taxara.

La puesta en servicio de la Central Hidroeléctrica de San Jacinto data del año 1989, formando desde entonces parte del sistema eléctrico de la ciudad de Tarija

Luego de revisada la información obtenida, como ser planos finales de construcción, y demás documentación referente al proyecto múltiple San Jacinto, podemos mencionar las siguientes características de las obras ejecutadas, según el siguiente detalle:

Figura 2. 37 Disposición general de obras del proyecto múltiple San Jacinto



Fuente: Archivos del Proyecto Múltiple San Jacinto

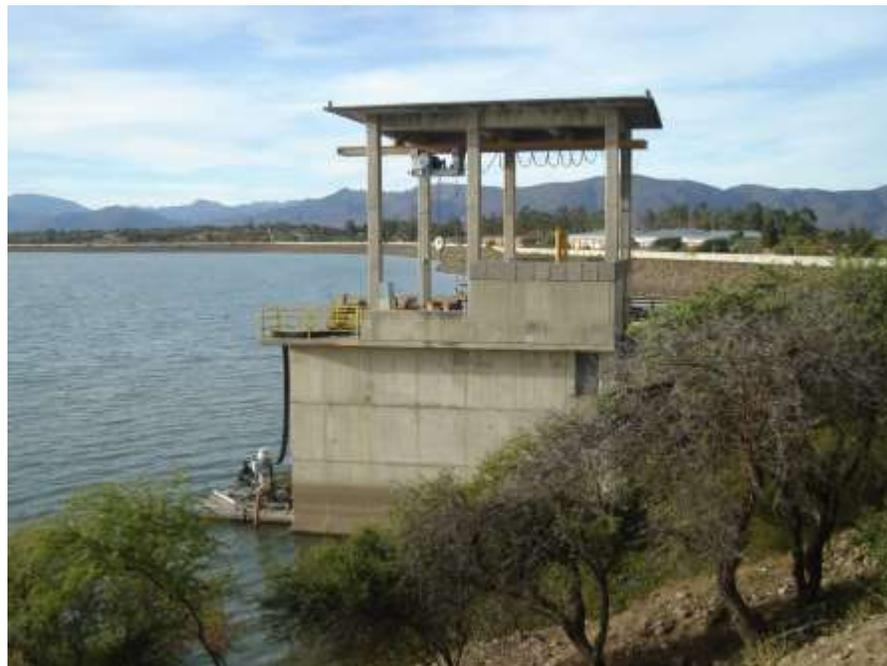
A continuación procederemos a detallar cada elemento de la central hidroeléctrica de San Jacinto, como ser la obra de toma, túnel de carga, chimenea de equilibrio, cámara de válvulas, tubería forzada, turbinas, tano de aspiración y canal de desagüe:

2.8.1 OBRA DE TOMA

Dicha obra cuenta con los componentes mostrados en la gráfica y sus datos de diseño son:

- Caudal = $16,6 \text{ m}^3/\text{s}$
- Nivel del umbral de la toma = 1863,64

Figura 2. 38 Obra de toma de la central hidroeléctrica de San Jacinto



Fuente: Elaboracion propia

2.8.2 TUNEL DE CARGA

El túnel de carga presenta estas características generales:

Tabla 2. 1 Características de túnel de carga

TUNEL DE CARGA:	
- Nivel del umbral de la toma	1863,95
-Diámetro del túnel	2,70 m
- Velocidad del agua para el caudal nominal	2,85 m/s

- Nivel de la solera a nivel de la chimenea de equilibrio	1854,29
- Longitud total del túnel	795,51 m

Fuente: Elaboracion propia

2.8.3 CHIMENEA DE EQUILIBRIO

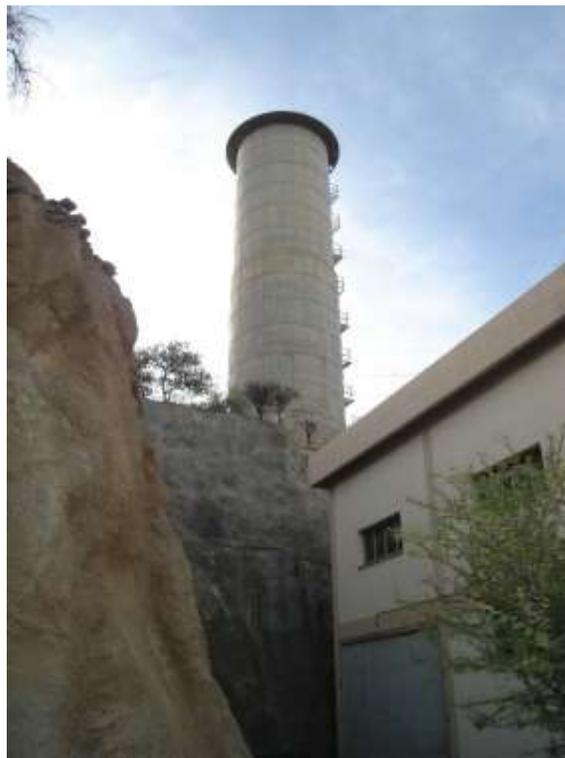
La chimenea de equilibrio cuenta con las siguientes características generales:

Tabla 2. 2 Características de la chimenea de equilibrio

CHIMENEA DE EQUILIBRIO:	
-Tipo	con Estrangulamiento
-Diámetro	6,50 m
-Cota del eje del túnel a nivel de la chimenea	1854,29
-Cota Máxima de la oscilación	1894,00
-Cota Mínima de la oscilación	1862,00

Fuente: Elaboracion propia

Figura 2. 39 Chimenea de equilibrio de la central hidroeléctrica de San Jacinto



Fuente: Elaboracion propia

2.8.4 CAMARA DE VALVULAS

Las características principales de la cámara de válvulas son las siguientes:

Tabla 2. 3 Características de la cámara de válvulas

CAMARA DE VALVULAS:	
-Nivel del umbral de la cámara	1853,98
-Toma de agua para riego-Diámetro	1,10 m
-Pantalón	2,70 m a 2 x 1,60 m
-Por cada tubería forzada una válvula de seguridad tipo mariposa con contrapeso-Diámetro	1,60 m
-Por conducto de riego, una válvula de seguridad con contrapeso-Diámetro	1,10 m

Fuente: Elaboracion propia

Figura 2. 40 Cámara de válvulas de la central hidroeléctrica



Fuente: Elaboracion propia

Figura 2. 41 Cámara de válvulas de la central hidroeléctrica



Fuente: Elaboracion propia

2.8.5 TUBERIA FORZADA

Las características importantes de la tubería forzada son:

Tabla 2. 4 Características de la tubería forzada

TUBERIA FORZADA:	
-Nivel de los ejes de las tuberías a la salida de la cámara	1853,70
-Nivel de los ejes de las tuberías a la llegada a las turbinas	1828,70
1ra Tubería Forzada	
-Diámetro	1,60 m
-Longitud desarrollada D=1.60m	48,34 m
-Pantalones	1,60 a 2 x 1,10 m
-Diámetro	1,10 m
-Longitud desarrollada D=1.10m	22,51 m
2da Tubería Forzada	
-Diámetro	1,60 m

-Longitud desarrollada D=1.60m	48,34 m
-Pantalones	1,60 a 2 x 1,10 m
-Diámetro	1,10 m
-Longitud desarrollada D=1.10m	20,83 m

Fuente: Elaboracion propia

Figura 2. 42 Vista de Tubería Forzada saliendo de cámara de válvulas



Fuente: Elaboracion propia

2.8.6 TURBINAS

Las turbinas de la central hidroeléctrica de San Jacinto, son cuatro, tipo Francis Espiral de eje horizontal, las cuales fueron diseñadas bajo los siguientes parámetros:

- Salto $H = 51 \text{ m}$
- Caudal $Q = 4,1 \text{ m}^3/\text{s}$
- Potencia $P = 1864 \text{ KW}$
- Velocidad $n = 500 \text{ r.p.m.}$
- Embalamiento $n_d = 905 \text{ r.p.m.}$
- Diámetro del rodete $D_{\text{max}} = 1000 \text{ mm}$

Figura 2. 43 Las cuatro turbinas Francis de eje horizontal en la central hidroeléctrica



Fuente: Elaboracion propia

Figura 2. 44 Rodetes de las turbinas tipo Francis de la central hidroeléctrica



Fuente: Elaboracion propia

2.8.7 TUBO DE ASPIRACION

Este es un importante elemento, pues en su sección de salida, es la utilizada para el cálculo de la altura neta en la turbina.

El nivel de la salida del tubo de aspiración, según se ve en la figura 2.45, es de 1824,95 msnm

Figura 2. 45 Esquema y fotografía de la sección de salida del tubo de aspiración

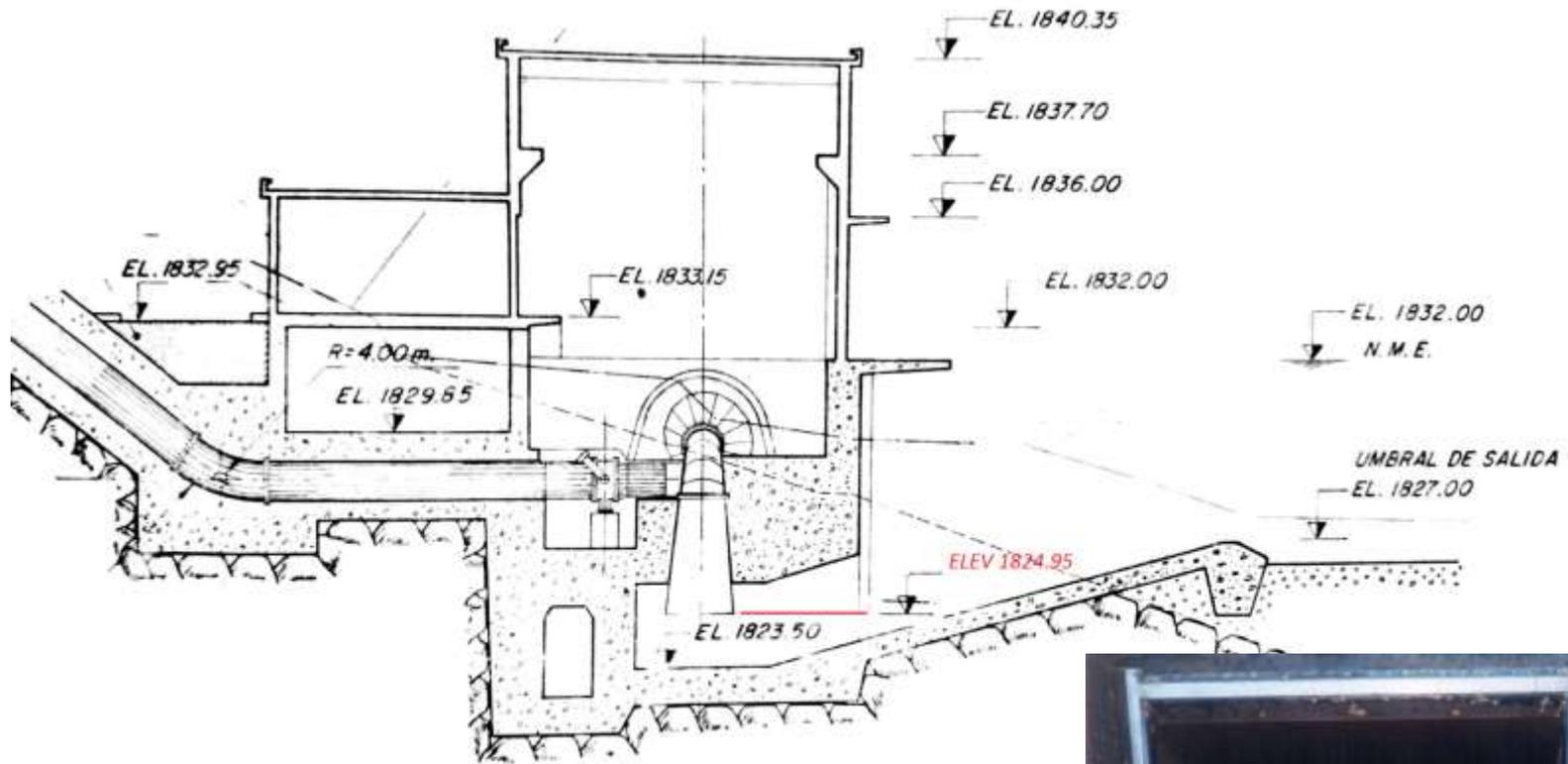


Figura 2. 46 Sección de salida del tubo de aspiración de la central hidroeléctrica



Fuente: Elaboracion propia

2.8.8 CANAL DE DESAGUE

EL canal de desagüe, evacua las aguas utilizadas en la central hidroeléctrica, el dato más importante es el nivel del umbral de vertedor, postrado también en la figura 2.47; dicho nivel es de 1827 msnm

Figura 2. 47 Canal de desfogue vacío



Fuente: Elaboracion propia

Figura 2. 48 Canal de desagüe lleno



Fuente: Elaboracion propia

- Altura con dos turbinas funcionando	55,30
- Altura con tres turbinas funcionando	55,20
- Altura con cuatro turbinas funcionando	55,10
PERDIDA DE CARGA:	
- Con una turbinas funcionando Q = 4.30 m ³ /s	1,25 m
- Con dos turbinas funcionando Q = 8.50 m ³ /s	3,04 m
- Con tres turbinas funcionando Q = 12.60 m ³ /s	3,80 m
- Con cuatro turbinas funcionando Q = 16.60 m³/s	4,50 m

Fuente: Elaboración propia

2.9.1.2 Eficiencia del sistema hidráulico inicial

Cuando nos referimos a sistema hidráulico de una central hidroeléctrica, hacemos referencia a todos los elementos o componentes que ayudan desde la captación, transporte y entrega de agua, hasta la entrada a las turbinas; su eficacia se mide en términos de pérdida de carga y se define como la relación entre la altura neta y la altura bruta

La altura neta o efectiva es la altura aprovechable después de reducir todas las pérdidas de energía que se pudieron suscitar dentro del sistema hidráulico (perdidas por fricción, por entrada, bifurcaciones, cambio de diámetro, etc.)

En consecuencia tenemos que para el sistema hidráulico diseñado inicialmente la:

- **Altura Bruta** (funcionando las cuatro turbinas simultáneamente y a su máxima capacidad).....**55,10 m**
- **Perdida de carga** (cuando las cuatro turbinas funcionan a su máxima capacidad).....**4,50 m**
- **Altura Neta** (para esta condición).....**50,60 m**

Tenemos entonces como resultado que la eficiencia del sistema hidráulico esperada según el diseño es de:

$$\eta = 92\%$$

2.9.2 CARACTERÍSTICAS ACTUALES DEL SALTO

Las características actuales del salto luego de la implementación de las presas inflables son en la actualidad:

Tabla 2. 6 Características actuales del salto

Nivel de Coronamiento - Presa bóveda	1888,50
Nivel de Coronamiento - Dique Tablada	1888,35
EMBALSE:	
- Nivel Máximo Normal	1884,00
- Nivel Máximo en crecida (T=10, 000 años)	1887,50
- Nivel Mínimo de explotación	1871,70
- Volumen Útil	49,44 Hm³ hasta 27,50 Hm³
SALTO BRUTO:	
- Altura Máxima	56,90
- Altura Mínima	44,30
- Altura con una turbinas funcionando	56,90
- Altura con dos turbinas funcionando	56,80
- Altura con tres turbinas funcionando	56,70
- Altura con cuatro turbinas funcionando	56,60

Fuente: Elaboración propia

CAP. III APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1 INFORMACION BASE

Para la elaboración de la de investigación y según se mencionó en el apartado 1.5 del presente trabajo, se procedió a la recolección de la siguiente información y de la siguiente manera:

- Se visitó las oficinas del Proyecto Múltiple San Jacinto, ubicadas en la zona El Portillo, para recolectar información final del proceso de ejecución de todos los componentes del proyecto, pero con mayor énfasis en lo que atañe a la central hidroeléctrica.

Es así que de estas instalaciones se recabaron planos conforme a ejecución, informes de diseños de los diferentes componentes del proyecto.

- Así mismo, se recabo información acerca de los niveles diarios de embalse de San Jacinto, para diferentes años.
- Adicionalmente a esto, se logró la autorización de la gerencia del proyecto múltiple San Jacinto, para la ejecución de un día de prueba para la realización de aforos energéticos para diferentes estados de carga de las turbinas de la central hidroeléctrica de San Jacinto; así mismo, la realización de aforos de caudales de agua evacuados (realizado por el SENAMHI) según los diferentes estados de carga a las que fueron sometidas las turbinas.

Dicha carta de aprobación, datos de observados según los diferentes estados de carga a las que fueron sometidas las turbinas, aforos de caudal (realizados por el SENAMHI) durante ese día de prueba, se muestra en el anexo I.

- También se visitaron las instalaciones de SETAR, de donde se recabo la información referente a la producción de energía anual y mensual para diferentes años de trabajo de la central hidroeléctrica de San Jacinto.
- Se visitaron las instalaciones de la central hidroeléctrica de San Jacinto para recabar información a nivel horaria detallada acerca del trabajo realizado por cada turbina cuando se encuentran la mismas en funcionamiento; esto con el fin de recabar para cada hora trabajada durante todo el año considerado, de las turbinas datos de apertura de distribuidor, presión a la entrada de la turbina, presión a la salida de la turbinas.

Según la disposición de la información solicitada y la predisponibilidad de los responsables, se nos proporcionó datos completos de lo solicitado de todo el año 2004. En el anexo II se deja ver la planilla de un día de trabajo para cada turbina,

3.2 ANALISIS ENERGETICO DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE SAN JACINTO

Como evaluación inicial, analizaremos el uso de la central hidroeléctrica de San Jacinto en los diferentes meses del año, o sea, tanto en periodo de lluvia como en periodo seco; como también su uso durante los diferentes años.

Para ello como se mencionó en el apartado anterior, se recabo información de la generación eléctrica de la central hidroeléctrica de San Jacinto, en tal situación procedemos a mostrar dicho resumen de la información y su correspondiente análisis a continuación:

3.2.1 PRODUCCION ANUAL DE ENERGIA ELECTRICA EN LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE SAN JACINTO

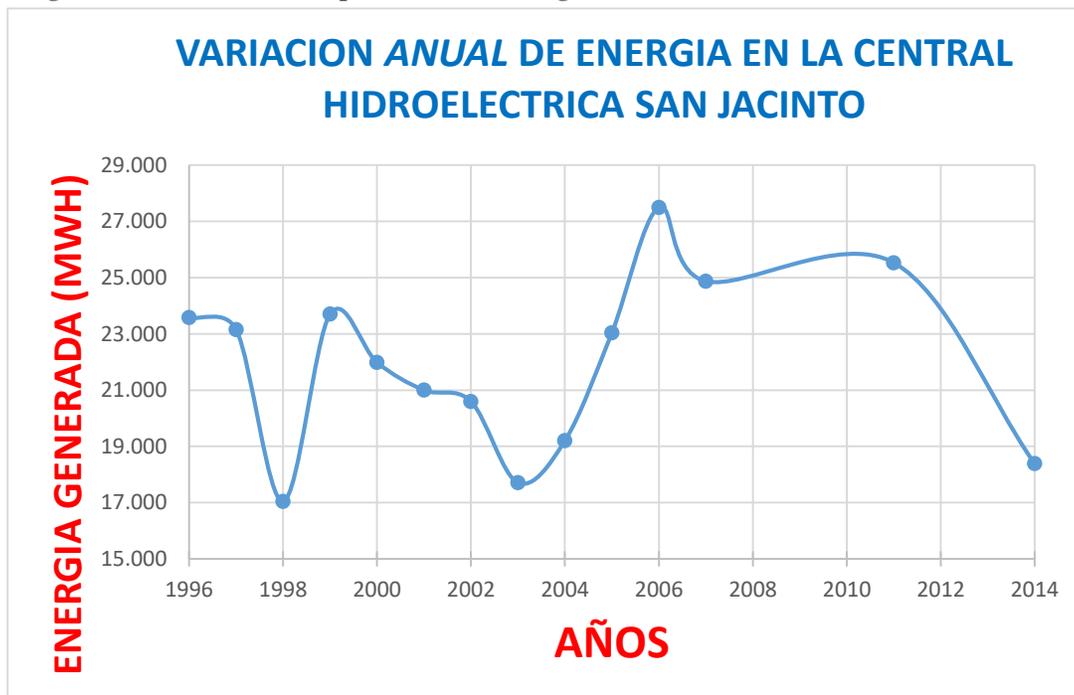
Para el análisis, se escogió de manera aleatoria diferentes años, los cuales nos darán una muestra de la evolución de la generación de la energía eléctrica en la central hidroeléctrica de San Jacinto, para dichos años escogidos:

Tabla 3. 2 Energía anual producida en la central hidroeléctrica

AÑO	ENERGIA MWH	AÑO	ENERGIA MWH
1996	23,582.07	2003	17,711.28
1997	23,152.01	2004	19,204.17
1998	17,046.99	2005	23,042.83
1999	23,709.63	2006	27,496.37
2000	21,988.11	2007	24,876.94
2001	21,000.75	2011	25,534.56
2002	20,597.51	2014	18,393.38

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos proporcionados por SETAR

Figura 3. 1 Variación de la producción de energía anual en central hidroeléctrica



Fuente: Elaboración propia, a partir de datos proporcionados por SETAR

Según podemos apreciar en el gráfico de la figura 3.1, la generación anual de energía en la central hidroeléctrica de San Jacinto no es constante, presenta variaciones importantes en su total generado en cada año.

De manera general la cantidad anual de generación energía hidráulica se debe principalmente a dos factores, los cuales son, el recurso disponible de agua en el embalse y al buen uso que se le dé a ese recurso.

En consecuencia, del gráfico de la figura 3.1, podemos inicialmente suponer que la variación en la producción de energía anual en la central hidroeléctrica de San Jacinto, se pudo deber a que en los años de poca producción energética anual de la central, es consecuencia de un limitado recurso de agua en el embalse, en otras palabra, que en dichos años como por ejemplo en 1998, el periodo de lluvias comenzó tardíamente y que el periodo lluvioso fue de duración mínima.

Pues en el otro caso estaríamos hablando de una deficiente operación de la central hidroeléctrica de San Jacinto, ya que teniendo recurso hídrico disponible para la generación, no se hizo uso.

3.2.2 PRODUCCION MENSUAL DE ENERGIA ELECTRICA EN LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE SAN JACINTO

De igual manera que en el análisis anual, en esta sección también se escogieron años de manera aleatoria para poder analizar el uso de la central hidroeléctrica de San Jacinto, dichos años con sus correspondientes datos de producción energética mensual son los siguientes:

Tabla 3. 3 Energía mensual producida en la central hidroeléctrica

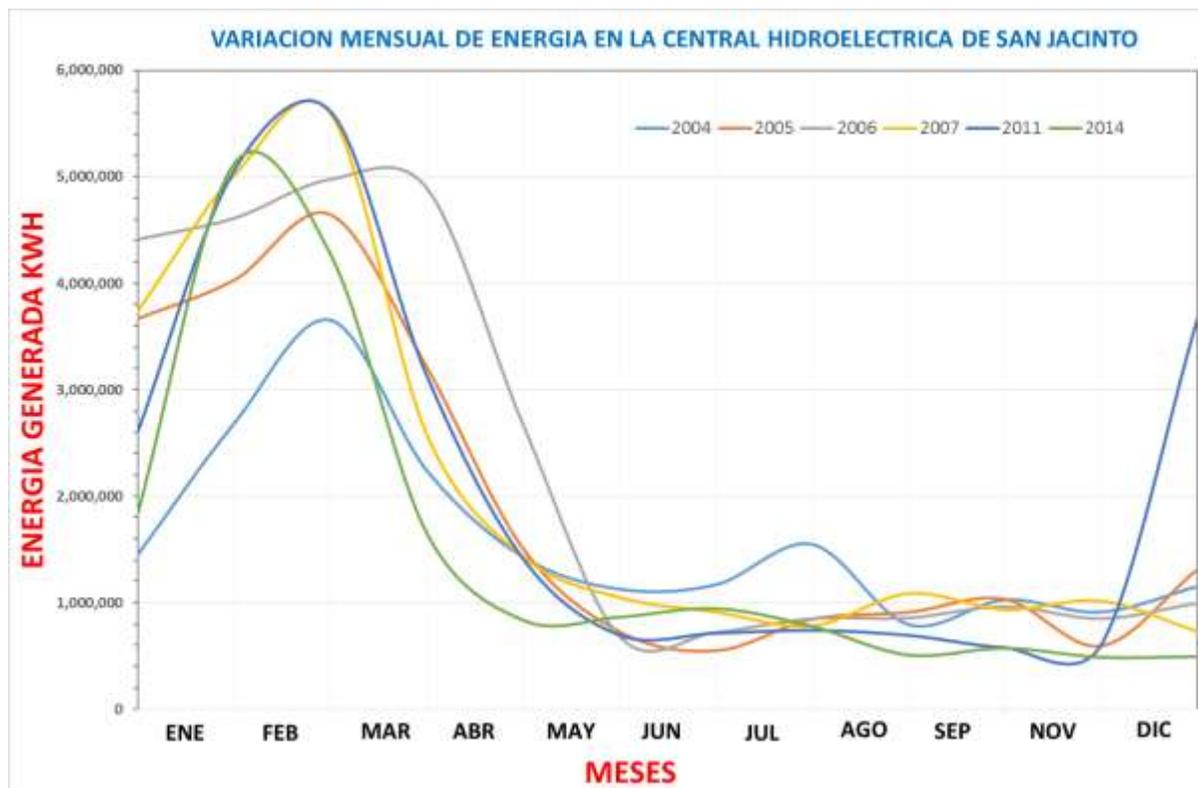
ENERGIA KWH						
MES	2004	2005	2006	2007	2011	2014
ENE	1,454,074.20	3,667,739.40	4,412,642.40	3,741,363.00	2,611,726.20	1,847,140.20
FEB	2,685,187.80	4,029,982.20	4,611,076.20	5,013,306.00	5,059,881.00	5,123,779.21
MAR	3,653,942.40	4,644,064.80	4,975,792.20	5,592,510.00	5,612,684.40	4,271,621.40
ABR	2,241,621.00	3,209,938.20	4,890,936.60	2,578,230.00	3,128,560.20	1,652,157.00

MAY	1,429,606.80	1,507,167.00	2,671,056.00	1,431,691.20	1,412,213.40	837,070.20
JUN	1,128,238.20	728,886.60	685,935.00	1,050,321.60	697,383.00	866,700.00
JUL	1,170,180.00	550,816.20	723,875.40	913,815.00	715,224.60	946,949.40
AGO	1,548,385.20	846,703.80	851,860.80	783,313.20	741,765.60	778,647.60
SEP	795,960.00	911,444.40	858,492.00	1,087,824.60	695,142.00	509,754.60
OCT	1,028,257.20	1,035,239.40	964,715.40	936,765.00	580,143.60	574,133.40
NOV	913,874.40	596,041.20	852,557.40	1,016,614.80	608,747.40	489,148.20
DIC	1,154,844.00	1,314,802.80	997,434.00	731,181.60	3,671,092.80	496,276.20
TOTAL	19,204,171.20	23,042,826.00	27,496,373.40	24,876,936.00	25,534,564.20	18,393,377.41

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos proporcionados por SETAR

De la tabla 3.3, podemos notar que en promedio el 65% de la producción de energía anual en la central hidroeléctrica de San Jacinto, se genera en los meses de enero, febrero, marzo y abril, en otras palabras, que en esos 4 meses se genera el 65% de la energía producida de manera anual, lo cual también es apreciable en el gráfico de la figura 3.2:

Figura 3. 2 Variación de la producción de energía mensual en central hidroeléctrica



Fuente: Elaboración propia, a partir de datos proporcionados por SETAR

Como podemos apreciar en el gráfico de la figura 3.2, la producción máxima de energía de la central hidroeléctrica de San Jacinto, se da en los meses de enero, febrero, marzo y abril.

También podemos apreciar que pese a que en estos meses (enero, febrero, marzo y abril) corresponden al periodo normal de lluvias, o sea, el nivel del embalse es el máximo o tiende a llegar ahí; en el gráfico de la figura 3.2, muestra una gran variación entre los valores de producción energética de la central hidroeléctrica de San Jacinto en los diferentes años y para las mismas épocas de lluvia.

3.2.3 PRODUCCION DIARIA DE ENERGIA ELECTRICA EN LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE SAN JACINTO

Para el análisis de la producción de energía diaria, tomamos dos días aleatorios del año 2004, tanto en periodo de estiaje como en periodo de lluvia, con el fin de apreciar como es la producción de energía diaria de la central hidroeléctrica.

3.2.3.1 Producción Diaria de energía en época de *estiaje*

Figura 3.3 Grafico de carga diaria de la central-Periodo Estiaje



Fuente: Elaboración propia, a partir de datos proporcionados por SETAR

Figura 3. 4 Grafico de carga diaria de la central-Periodo Estiaje



Fuente: Elaboración propia, a partir de datos proporcionados por SETAR

Según se aprecia en los gráficos de carga de las figuras 3.3 y 3.4, la central hidroeléctrica de San Jacinto, en periodo de estiaje funciona como central de punta. O sea, solo entra en funcionamiento en la hora de mayor demanda en la ciudad de Tarija.

3.2.3.2 Producción Diaria de energía en época de *lluvia*

Figura 3. 5 Grafico de carga diaria de la central-Periodo Lluvioso



Fuente: Elaboración propia, a partir de datos proporcionados por SETAR

Figura 3. 6 Grafico de carga diaria de la central-Periodo Lluvioso



Fuente: Elaboración propia, a partir de datos proporcionados por SETAR

Según podemos apreciar en los gráficos de carga diaria de la central hidroeléctrica de San Jacinto en periodo lluvioso, la carga va creciendo y presenta un pico relativo a horas del mediodía volviendo a descender un poco, para luego de esto, alcanzar un pico mayor en las horas de la noche.

Lo curioso es que si se hiciese un eficiente uso energético del recurso disponible en esta época, la central debería funcionar de manera constante y a su máxima capacidad, pero según se ve, no se opera la central hidroeléctrica de esta manera.

3.2.4. RECURSO ENERGETICO DISPONIBLE EN EL EMBALSE Y SU EFECTO EN EL USO DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA

Para el análisis de un uso energético eficiente en la central hidroeléctrica de San Jacinto, utilizaremos los niveles diarios del agua en el embalse de San Jacinto durante todos los años en análisis.

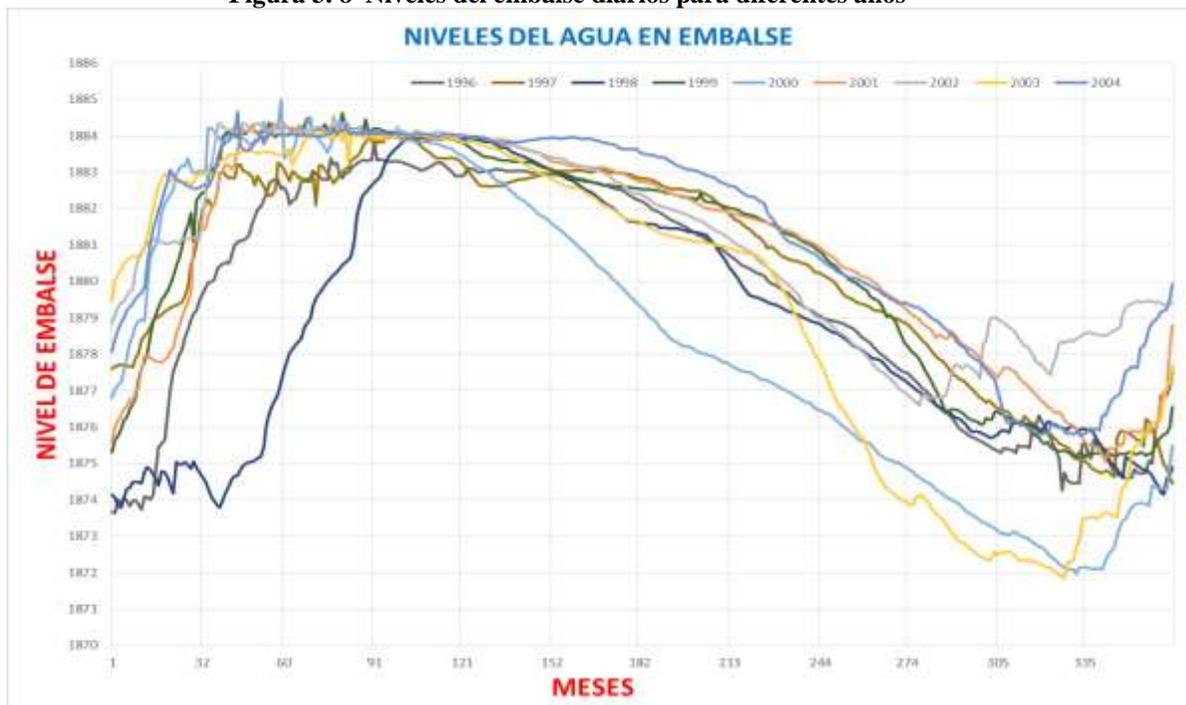
Dichos niveles de agua en el embalse durante algún año determinado, nos dice cuanto de volumen de agua estuvo almacenado durante todo el año.

Es así que introducimos el criterio de volumen de recurso hídrico medio disponible anualmente, el cual resulta de la integración del área bajo la curva de volúmenes útiles según se ejemplifica en la figura 3.7, dicha curva es de igual forma que de los niveles de embalse.

Figura 3. 7 Área bajo los niveles de embalse o volumen útil



Figura 3. 8 Niveles del embalse diarios para diferentes años



Fuente: Elaboración propia, a partir de datos proporcionados por el Proyecto Múltiple San Jacinto

Es así que con los niveles del embalse para diferentes años y con la ayuda de la curva de *niveles vs volúmenes útiles* del embalse de San Jacinto, podemos encontrar una curva de volúmenes útiles en función del tiempo para cualquier año que se requiera analizar; es decir, tendríamos que para cada nivel del embalse corresponde un volumen útil y con esa secuencia anual de volúmenes útiles según la altura del embalse en cada año tenemos una curva de forma similar a la curva de niveles de embalse, solo que ahora en volúmenes útiles; integramos dicha curva o en otras palabras, hallamos el área bajo la curva, según se ejemplifica en la figura 3.7 y nos da el volumen de recurso hídrico medio disponible anualmente en el embalse para el año analizado.

Dichos valores encontrados para diferentes años, se los muestra a continuación:

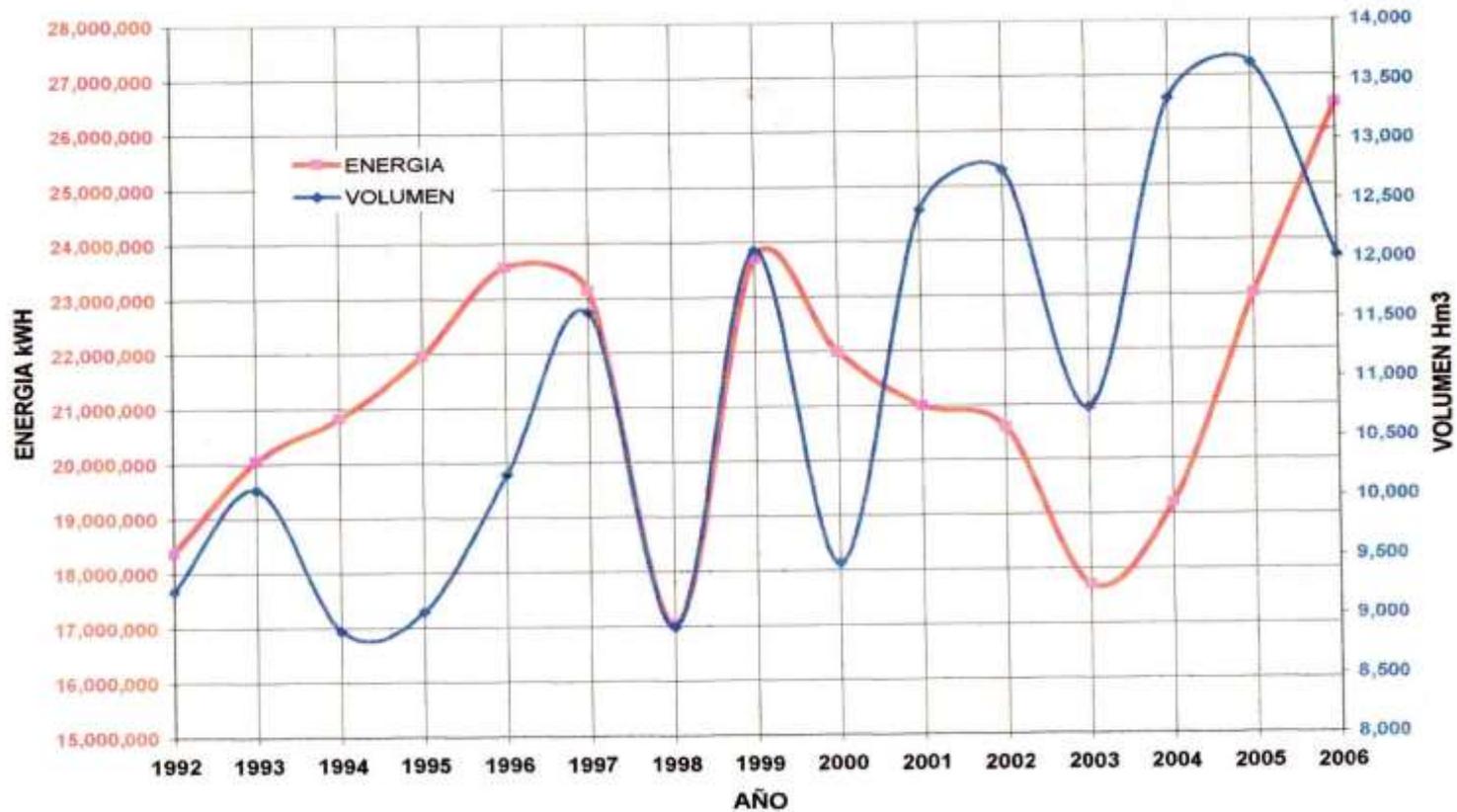
Tabla 3. 4 Volumen de recurso hídrico medio disponible anualmente

AÑO	VOLUMEN HM3
1992	9,400.00
1993	10,300.00
1994	8,900.00
1995	9,100.00
1996	10,350.00
1997	11,500.00
1998	8,950.00
1999	12,000.00
2000	9,450.00
2001	12,300.00
2002	12,650.00
2003	10,750.00
2004	13,350.00
2005	13,600.00
2006	12,000.00

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos proporcionados por el Proyecto múltiple San Jacinto

Es así que fusionando ambos datos obtenidos de volúmenes útiles disponibles medios anuales en el embalse y la producción anual de energía (figura 3.1) tenemos como resultado el siguiente gráfico:

Figura 3.9 Comparación entre la Energía anual de la central hidroeléctrica y los volúmenes de agua disponibles en el embalse



Fuente: Elaboración propia

Recordando análisis realizados anteriormente:

- Según resultamos mostrados en la Figura 3.1 se evidencio gran variación en la producción de energía eléctrica anual en la central y atribuyendo posiblemente tal situación a la posible falta de disponibilidad de recurso energético en el embalse.
- También en la figura 3.2, se analizó que la producción máxima de energía de la central hidroeléctrica de San Jacinto, se da en los meses de enero, febrero, marzo y abril.

También apreciamos que pese a que en estos meses (enero, febrero, marzo y abril) corresponden al periodo normal de lluvias, o sea, el nivel del embalse es el máximo o tiende a llegar ahí; se muestra también una gran variación entre los valores de producción energética de la central hidroeléctrica de San Jacinto en los diferentes años y para las mismas épocas de lluvia.

- Según se aprecia en los gráficos de carga diaria en las figuras 3.3 y 3.4, la central hidroeléctrica de San Jacinto, en periodo de estiaje funciona como central de punta. O sea, solo entra en funcionamiento en la hora de mayor demanda en la ciudad de Tarija
- También se pudo apreciar el los gráficos de carga diaria de la central hidroeléctrica de San Jacinto en periodo lluvioso (figura 3.5 y 3.6), la carga va creciendo y presenta un pico relativo a horas del mediodía volviendo a descender un poco, para luego de esto, alcanzar un pico mayor en las horas de la noche.

Lo curioso es que si se hiciese un eficiente uso energético del recurso disponible en esta época, la central debería funcionar de manera constante y a su máxima capacidad, pero según se ve, no se opera la central hidroeléctrica de esta manera.

Con todos los antecedentes citados y con la ayuda de los resultados plasmados en el gráfico de la figura 3.9 podemos concluir que existen años de poca producción anual de energía en la central, debidos a que en dichos años el recurso disponible fue escaso, o sea, fue un año donde las lluvias comenzaron retrasadas y el periodo lluvioso fue corto; como por ejemplo el año 1998, donde se ve que el recurso energético en el embalse fue menor y en consecuencia la producción de energía en la central hidroeléctrica de San Jacinto se vio limitada y también fue baja.

Pero también vemos que existen ejemplos de uso deficiente de la central hidroeléctrica de San Jacinto, por ejemplo el año 2004, donde el recurso energético en el embalse era alto, la producción energética en la central hidroeléctrica fue bajo.

3.3 EVALUACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HIDRAULICO DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE SAN JACINTO

Para realizar la evaluación del funcionamiento del sistema hidráulico de la central hidroeléctrica de San Jacinto, introduciremos el concepto de *eficiencia hidráulica* de una central hidroeléctrica.

Cuando nos referimos a sistema hidráulico de una central hidroeléctrica, hacemos referencia a todos los elementos o componentes que ayudan desde el embalse, la captación, transporte y entrega de agua, hasta las turbinas; su eficacia se mide en términos de pérdida de carga y se define como la relación entre la altura neta y la altura bruta:

$$\eta_h = \frac{H_n}{H_T}$$

Donde:

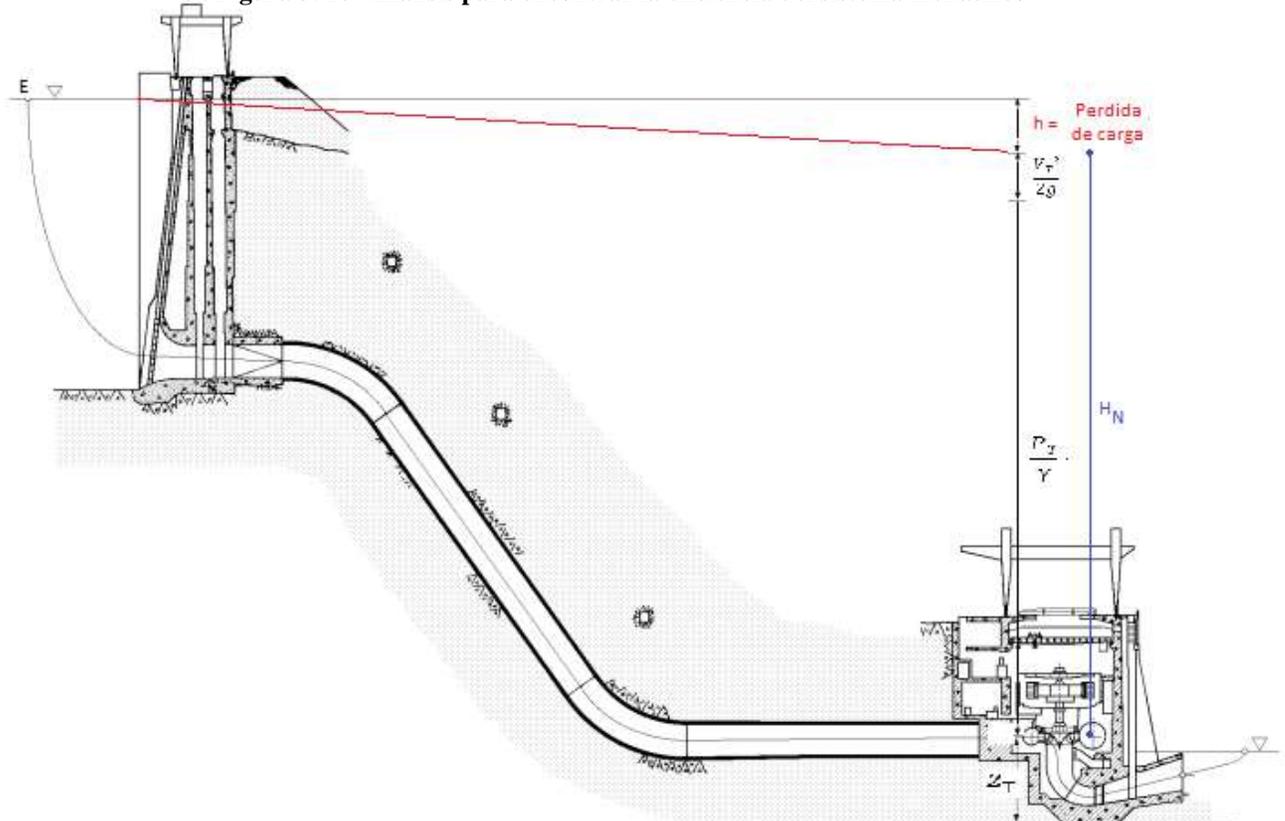
H_n = altura neta

$H_T =$ altura total

La altura neta o efectiva es la altura aprovechable después de reducir todas las pérdidas de energía que se pudieron suscitar dentro del sistema hidráulico (pérdidas por fricción, por entrada, bifurcaciones, cambio de diámetro, etc.)

Para ello, aplicamos la ecuación de Bernoulli entre las secciones E (Nivel del embalse) y la sección T (a la entrada de la turbina), tenemos entonces:

Figura 3. 10 Análisis para encontrar la eficiencia del sistema hidráulico



Fuente: Elaboración propia

$$Z_E + \frac{P_E}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2g} = Z_T + \frac{P_T}{\gamma} + \frac{V_T^2}{2g} + h$$

Siendo: $\frac{P_E}{\gamma} = 0,$ $\frac{V_E^2}{2g} = 0$

Reacomodando la ecuación tenemos que, la *pérdida de carga* en el sistema hidráulico será:

$$h = (Z_E - Z_T) - \frac{P_T}{\gamma} - \frac{V_T^2}{g}$$

En consecuencia, la Altura Neta del sistema hidráulico será:

$$H_N = (Z_E - Z_T) - h$$

Y recordando que la eficiencia hidráulica es:

$$\eta = \frac{H_N}{H_B}$$

Recordando que el nivel de los ejes de las tuberías a la llegada a las turbinas es de:

$$Z_T = 1828,70 \text{ msnm}$$

Es así que procedemos a calcular la eficiencia hidráulica para las turbinas en análisis, a saber la turbina 1B y la turbina 2B, según se aclaró y explico en la sección 1.5:

3.3.1 ANALISIS PARA TURBINA 1B

Según análisis realizado procedemos a la evaluación del sistema hidráulico en la *turbina 1B*, considerando para el cálculo el caudal nominal de diseño de la turbina, el cual es de 4,1 m³/s (el cual también fue validado en las pruebas de aforo realizadas en el día de prueba en la central hidroeléctrica

de San Jacinto); y las diferentes mediciones de niveles del embalse y presión del agua a la entrada de la turbina.

Poniendo la ecuación de pérdida de carga h , en función de caudal, sabiendo que el diámetro de la tubería a la llegada de la turbina es de 1,10 m, es así que la ecuación de pérdida de carga, toma la forma de:

$$h = (Z_E - Z_T) - \frac{P_T}{\gamma} - 0,0565Q^2$$

En la siguiente tabla se muestra todas las variables del cálculo y el resultado:

Tabla 3. 5 Eficiencia en la turbina 1B

GRUPO N°1					
TURBINA "B"					
Nivel Embalse	Presión Entrada Bar	Salto Bruto H_B (m)	Perdida Carga h (m)	Salto Neto H_N (m)	Eficiencia η
1883,82	4,80	55,12	5,21	49,91	91%
1883,82	4,80	55,12	5,21	49,91	91%
1883,86	4,80	55,16	5,25	49,91	90%
1883,86	4,80	55,16	5,25	49,91	90%
1884,01	4,80	55,31	5,40	49,91	90%
1884,01	4,80	55,31	5,40	49,91	90%
1884,67	4,80	55,97	6,06	49,91	89%
1884,07	4,80	55,37	5,46	49,91	90%
1884,02	4,90	55,32	4,39	50,93	92%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,06	4,80	55,36	5,45	49,91	90%
1884,06	4,80	55,36	5,45	49,91	90%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,04	4,80	55,34	5,43	49,91	90%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,02	4,90	55,32	4,39	50,93	92%

1884,07	4,80	55,37	5,46	49,91	90%
1884,07	4,80	55,37	5,46	49,91	90%
1884,06	4,80	55,36	5,45	49,91	90%
1884,06	4,80	55,36	5,45	49,91	90%
1884,04	5,00	55,34	3,39	51,95	94%
1884,04	4,80	55,34	5,43	49,91	90%
1884,03	4,80	55,33	5,42	49,91	90%
1884,03	4,80	55,33	5,42	49,91	90%
1884,11	4,80	55,41	5,50	49,91	90%
1884,06	4,80	55,36	5,45	49,91	90%
1884,06	4,80	55,36	5,45	49,91	90%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,00	4,80	55,30	5,39	49,91	90%
1884,00	4,80	55,30	5,39	49,91	90%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,03	4,80	55,33	5,42	49,91	90%
1884,03	4,80	55,33	5,42	49,91	90%
1884,03	4,80	55,33	5,42	49,91	90%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,02	4,80	55,32	5,41	49,91	90%
1884,01	4,80	55,31	5,40	49,91	90%
1884,01	4,80	55,31	5,40	49,91	90%
1883,99	4,80	55,29	5,38	49,91	90%
1884,04	4,80	55,34	5,43	49,91	90%
1884,04	4,80	55,34	5,43	49,91	90%
1884,03	4,80	55,33	5,42	49,91	90%
1883,98	4,80	55,28	5,37	49,91	90%
1883,98	4,80	55,28	5,37	49,91	90%
1883,99	4,90	55,29	4,36	50,93	92%
1883,99	4,80	55,29	5,38	49,91	90%
1883,98	4,80	55,28	5,37	49,91	90%
1883,98	4,80	55,28	5,37	49,91	90%
1883,97	4,80	55,27	5,36	49,91	90%
1883,97	4,80	55,27	5,36	49,91	90%
1883,96	4,80	55,26	5,35	49,91	90%
1883,96	4,80	55,26	5,35	49,91	90%
1883,94	4,80	55,24	5,33	49,91	90%

1883,88	4,80	55,18	5,27	49,91	90%
1883,88	4,80	55,18	5,27	49,91	90%
1883,85	4,80	55,15	5,24	49,91	90%
1883,81	4,80	55,11	5,20	49,91	91%
1883,79	4,80	55,09	5,18	49,91	91%
1883,79	4,80	55,09	5,18	49,91	91%
1883,82	4,80	55,12	5,21	49,91	91%
1883,82	4,80	55,12	5,21	49,91	91%
1883,82	4,30	55,12	10,31	44,81	81%
1883,82	4,80	55,12	5,21	49,91	91%
1883,87	4,80	55,17	5,26	49,91	90%
1883,86	4,80	55,16	5,25	49,91	90%
1883,86	4,80	55,16	5,25	49,91	90%
1883,82	4,80	55,12	5,21	49,91	91%
1883,30	4,70	54,60	5,71	48,89	90%
1883,30	4,70	54,60	5,71	48,89	90%
1883,23	4,70	54,53	5,64	48,89	90%
1883,14	4,70	54,44	5,55	48,89	90%
1883,12	4,70	54,42	5,53	48,89	90%
1883,05	4,70	54,35	5,46	48,89	90%
1883,03	4,70	54,33	5,44	48,89	90%
1882,99	4,70	54,29	5,40	48,89	90%
1882,99	4,70	54,29	5,40	48,89	90%
1882,96	4,60	54,26	6,39	47,87	88%
1882,72	4,60	54,02	6,15	47,87	89%
1882,58	4,60	53,88	6,01	47,87	89%
1882,58	4,60	53,88	6,01	47,87	89%
1882,52	4,60	53,82	5,95	47,87	89%
1882,52	4,60	53,82	5,95	47,87	89%
1882,47	4,60	53,77	5,90	47,87	89%
1882,32	4,60	53,62	5,75	47,87	89%
1882,29	4,60	53,59	5,72	47,87	89%
1882,29	4,60	53,59	5,72	47,87	89%
1882,19	4,60	53,49	5,62	47,87	89%
1882,09	4,60	53,39	5,52	47,87	90%
1882,09	4,60	53,39	5,52	47,87	90%
1882,09	4,60	53,39	5,52	47,87	90%
1882,09	4,60	53,39	5,52	47,87	90%
1881,90	4,70	53,20	4,31	48,89	92%
1881,90	4,60	53,20	5,33	47,87	90%

1881,90	4,60	53,20	5,33	47,87	90%
1881,77	4,60	53,07	5,20	47,87	90%
1881,77	4,60	53,07	5,20	47,87	90%
1881,68	4,60	52,98	5,11	47,87	90%
1881,68	4,60	52,98	5,11	47,87	90%
1881,68	4,60	52,98	5,11	47,87	90%
1881,68	4,60	52,98	5,11	47,87	90%
1881,68	4,60	52,98	5,11	47,87	90%
1881,56	4,60	52,86	4,99	47,87	91%
1881,56	4,60	52,86	4,99	47,87	91%
1881,56	4,60	52,86	4,99	47,87	91%
1881,42	4,60	52,72	4,85	47,87	91%
1881,42	4,60	52,72	4,85	47,87	91%
1881,42	4,60	52,72	4,85	47,87	91%
1881,29	4,60	52,59	4,72	47,87	91%
1881,29	4,60	52,59	4,72	47,87	91%
1881,00	4,60	52,30	4,43	47,87	92%
1881,00	4,50	52,30	5,45	46,85	90%
1880,89	4,50	52,19	5,34	46,85	90%
1880,89	4,50	52,19	5,34	46,85	90%
1880,77	4,50	52,07	5,22	46,85	90%
1880,72	4,50	52,02	5,17	46,85	90%
1880,72	4,50	52,02	5,17	46,85	90%
1880,62	4,50	51,92	5,07	46,85	90%
1880,62	4,50	51,92	5,07	46,85	90%
1880,56	4,50	51,86	5,01	46,85	90%
1880,50	4,50	51,80	4,95	46,85	90%
1880,50	4,50	51,80	4,95	46,85	90%
1880,44	4,50	51,74	4,89	46,85	91%
1880,35	4,50	51,65	4,80	46,85	91%
1880,35	4,50	51,65	4,80	46,85	91%
1879,77	4,40	51,07	5,24	45,83	90%
1879,27	4,40	50,57	4,74	45,83	91%
1879,27	4,40	50,57	4,74	45,83	91%
1879,16	4,40	50,46	4,63	45,83	91%
1878,64	4,40	49,94	4,11	45,83	92%
1878,55	4,30	49,85	5,04	44,81	90%
1878,35	4,30	49,65	4,84	44,81	90%
1878,35	4,20	49,65	5,86	43,79	88%
1878,26	4,30	49,56	4,75	44,81	90%
1878,20	4,30	49,50	4,69	44,81	91%

1878,20	4,30	49,50	4,69	44,81	91%
1878,02	4,40	49,32	3,49	45,83	93%
1877,78	4,20	49,08	5,29	43,79	89%
1877,78	4,20	49,08	5,29	43,79	89%
1877,57	4,20	48,87	5,08	43,79	90%
1877,47	4,20	48,77	4,98	43,79	90%
1876,35	4,20	47,65	3,86	43,79	92%
1876,17	4,10	47,47	4,70	42,77	90%
1876,11	4,10	47,41	4,64	42,77	90%
1876,11	4,10	47,41	4,64	42,77	90%
1876,04	4,10	47,34	4,57	42,77	90%
1875,79	4,10	47,09	4,32	42,77	91%
1876,07	4,10	47,37	4,60	42,77	90%
1875,84	4,10	47,14	4,37	42,77	91%
1875,84	4,00	47,14	5,39	41,75	89%
1875,77	4,10	47,07	4,30	42,77	91%
1875,83	4,10	47,13	4,36	42,77	91%
1875,94	4,20	47,24	3,45	43,79	93%
1875,93	4,10	47,23	4,46	42,77	91%
1877,67	4,20	48,97	5,18	43,79	89%
1878,23	4,30	49,53	4,72	44,81	90%
1878,23	4,30	49,53	4,72	44,81	90%
1878,23	4,30	49,53	4,72	44,81	90%
1878,71	4,30	50,01	5,20	44,81	90%
1878,71	4,30	50,01	5,20	44,81	90%
1878,86	4,30	50,16	5,35	44,81	89%
1878,86	4,30	50,16	5,35	44,81	89%
1878,86	4,30	50,16	5,35	44,81	89%
1879,20	4,40	50,50	4,67	45,83	91%
1879,20	4,40	50,50	4,67	45,83	91%
1879,24	4,40	50,54	4,71	45,83	91%
1879,24	4,40	50,54	4,71	45,83	91%
1879,53	4,40	50,83	5,00	45,83	90%
1879,92	4,40	51,22	5,39	45,83	89%
1879,92	4,40	51,22	5,39	45,83	89%
1879,92	4,40	51,22	5,39	45,83	89%
1879,92	4,40	51,22	5,39	45,83	89%

Fuente: Elaboración propia

Según se puede apreciar, la eficiencia del sistema hidráulico es en promedio y por lo general del **90 %** para la turbina B del grupo 1.

3.3.2 ANALISIS PARA TURBINA 2B

Según análisis realizado procedemos a la evaluación del sistema hidráulico en la **turbina 2B**, considerando para el cálculo el caudal nominal de diseño de la turbina, el cual es de 4,1 m³/s (el cual también fue validado en las pruebas de aforo realizadas en el día de prueba en la central hidroeléctrica de San Jacinto); y las diferentes mediciones de niveles del embalse y presión del agua a la entrada de la turbina.

Poniendo la ecuación de pérdida de carga **h**, en función de caudal, sabiendo que el diámetro de la tubería a la llegada de la turbina es de 1,10 m, es así que la ecuación de pérdida de carga, toma la forma de:

$$h = (Z_E - Z_T) - \frac{P_T}{\gamma} - 0,0565Q^2$$

En la siguiente tabla se muestra todas las variables del cálculo y el resultado:

Tabla 3. 6 Eficiencia en la turbina 2B

GRUPO N°2					
TURBINA "B"					
Nivel Embalse	Presión Entrada Bar	Salto Bruto H _B (m)	Perdida Carga h (m)	Salto Neto H _N (m)	Eficiencia η
1883,82	5,10	55,12	2,15	52,97	96%
1883,82	5,00	55,12	3,17	51,95	94%
1883,86	5,00	55,16	3,21	51,95	94%
1883,86	5,00	55,16	3,21	51,95	94%
1884,01	5,00	55,31	3,36	51,95	94%
1884,01	5,00	55,31	3,36	51,95	94%
1884,67	5,20	55,97	1,98	53,99	96%
1884,07	4,80	55,37	5,46	49,91	90%

1884,02	5,00	55,32	3,37	51,95	94%
1884,02	5,00	55,32	3,37	51,95	94%
1884,06	5,10	55,36	2,39	52,97	96%
1884,06	5,00	55,36	3,41	51,95	94%
1884,02	5,00	55,32	3,37	51,95	94%
1884,04	4,90	55,34	4,41	50,93	92%
1884,02	5,20	55,32	1,33	53,99	98%
1884,02	4,90	55,32	4,39	50,93	92%
1884,02	5,00	55,32	3,37	51,95	94%
1884,02	5,10	55,32	2,35	52,97	96%
1884,02	5,00	55,32	3,37	51,95	94%
1884,00	4,90	55,30	4,37	50,93	92%
1884,00	4,90	55,30	4,37	50,93	92%
1883,99	4,90	55,29	4,36	50,93	92%
1883,99	5,00	55,29	3,34	51,95	94%
1884,04	4,90	55,34	4,41	50,93	92%
1884,07	4,90	55,37	4,44	50,93	92%
1884,24	5,00	55,54	3,59	51,95	94%
1884,24	5,00	55,54	3,59	51,95	94%
1884,04	5,00	55,34	3,39	51,95	94%
1884,14	5,00	55,44	3,49	51,95	94%
1884,21	4,90	55,51	4,58	50,93	92%
1884,21	4,90	55,51	4,58	50,93	92%
1884,21	4,90	55,51	4,58	50,93	92%
1884,10	4,90	55,40	4,47	50,93	92%
1884,10	4,90	55,40	4,47	50,93	92%
1884,10	4,90	55,40	4,47	50,93	92%
1884,04	5,00	55,34	3,39	51,95	94%
1884,04	5,00	55,34	3,39	51,95	94%
1884,09	5,10	55,39	2,42	52,97	96%
1884,09	5,00	55,39	3,44	51,95	94%
1884,07	5,00	55,37	3,42	51,95	94%
1884,07	5,00	55,37	3,42	51,95	94%
1884,07	5,00	55,37	3,42	51,95	94%
1884,07	5,00	55,37	3,42	51,95	94%
1884,12	5,10	55,42	2,45	52,97	96%
1884,10	5,00	55,40	3,45	51,95	94%
1884,10	5,00	55,40	3,45	51,95	94%
1884,10	5,00	55,40	3,45	51,95	94%
1884,10	5,00	55,40	3,45	51,95	94%

1884,03	5,10	55,33	2,36	52,97	96%
1884,03	5,00	55,33	3,38	51,95	94%
1884,03	5,00	55,33	3,38	51,95	94%
1884,03	5,00	55,33	3,38	51,95	94%
1884,06	5,00	55,36	3,41	51,95	94%
1884,06	5,00	55,36	3,41	51,95	94%
1884,06	5,00	55,36	3,41	51,95	94%
1884,06	5,00	55,36	3,41	51,95	94%
1884,06	5,00	55,36	3,41	51,95	94%
1884,06	5,00	55,36	3,41	51,95	94%
1884,07	4,90	55,37	4,44	50,93	92%
1884,07	4,90	55,37	4,44	50,93	92%
1884,06	4,90	55,36	4,43	50,93	92%
1884,06	5,00	55,36	3,41	51,95	94%
1884,04	5,00	55,34	3,39	51,95	94%
1884,04	5,00	55,34	3,39	51,95	94%
1884,03	4,90	55,33	4,40	50,93	92%
1884,03	4,90	55,33	4,40	50,93	92%
1884,11	4,90	55,41	4,48	50,93	92%
1884,06	5,00	55,36	3,41	51,95	94%
1884,06	5,00	55,36	3,41	51,95	94%
1884,02	4,90	55,32	4,39	50,93	92%
1884,02	4,90	55,32	4,39	50,93	92%
1884,02	4,90	55,32	4,39	50,93	92%
1884,00	4,90	55,30	4,37	50,93	92%
1884,00	4,90	55,30	4,37	50,93	92%
1884,02	4,90	55,32	4,39	50,93	92%
1884,02	4,90	55,32	4,39	50,93	92%
1884,03	4,90	55,33	4,40	50,93	92%
1884,03	4,90	55,33	4,40	50,93	92%
1884,03	5,00	55,33	3,38	51,95	94%
1884,02	5,00	55,32	3,37	51,95	94%
1884,02	5,00	55,32	3,37	51,95	94%
1884,01	5,00	55,31	3,36	51,95	94%
1884,01	5,00	55,31	3,36	51,95	94%
1883,99	5,00	55,29	3,34	51,95	94%
1884,04	4,90	55,34	4,41	50,93	92%
1884,04	4,90	55,34	4,41	50,93	92%
1884,03	5,00	55,33	3,38	51,95	94%
1883,98	5,00	55,28	3,33	51,95	94%

1883,98	5,10	55,28	2,31	52,97	96%
1883,99	5,10	55,29	2,32	52,97	96%
1883,99	5,00	55,29	3,34	51,95	94%
1883,98	4,90	55,28	4,35	50,93	92%
1883,98	4,90	55,28	4,35	50,93	92%
1883,97	5,00	55,27	3,32	51,95	94%
1883,97	5,00	55,27	3,32	51,95	94%
1883,96	5,00	55,26	3,31	51,95	94%
1883,96	5,00	55,26	3,31	51,95	94%
1883,94	5,00	55,24	3,29	51,95	94%
1883,88	4,90	55,18	4,25	50,93	92%
1883,88	4,90	55,18	4,25	50,93	92%
1883,85	4,90	55,15	4,22	50,93	92%
1883,81	4,90	55,11	4,18	50,93	92%
1883,79	4,90	55,09	4,16	50,93	92%
1883,79	4,90	55,09	4,16	50,93	92%
1883,82	5,00	55,12	3,17	51,95	94%
1883,82	5,00	55,12	3,17	51,95	94%
1883,82	4,90	55,12	4,19	50,93	92%
1883,82	4,90	55,12	4,19	50,93	92%
1883,87	5,00	55,17	3,22	51,95	94%
1883,86	5,00	55,16	3,21	51,95	94%
1883,86	5,00	55,16	3,21	51,95	94%
1883,82	5,00	55,12	3,17	51,95	94%
1883,30	4,90	54,60	3,67	50,93	93%
1883,30	4,90	54,60	3,67	50,93	93%
1883,23	4,90	54,53	3,60	50,93	93%
1883,14	4,90	54,44	3,51	50,93	94%
1883,12	4,90	54,42	3,49	50,93	94%
1883,05	4,90	54,35	3,42	50,93	94%
1883,03	4,90	54,33	3,40	50,93	94%
1882,99	4,80	54,29	4,38	49,91	92%
1882,99	4,80	54,29	4,38	49,91	92%
1882,96	4,80	54,26	4,35	49,91	92%
1882,72	4,80	54,02	4,11	49,91	92%
1882,58	4,80	53,88	3,97	49,91	93%
1882,58	4,80	53,88	3,97	49,91	93%
1882,52	4,80	53,82	3,91	49,91	93%
1882,52	4,80	53,82	3,91	49,91	93%
1882,47	4,80	53,77	3,86	49,91	93%

1882,32	4,80	53,62	3,71	49,91	93%
1882,29	4,80	53,59	3,68	49,91	93%
1882,29	4,80	53,59	3,68	49,91	93%
1882,19	4,80	53,49	3,58	49,91	93%
1882,09	4,80	53,39	3,48	49,91	93%
1882,09	4,80	53,39	3,48	49,91	93%
1882,09	4,80	53,39	3,48	49,91	93%
1882,09	4,80	53,39	3,48	49,91	93%
1881,90	4,80	53,20	3,29	49,91	94%
1881,90	4,80	53,20	3,29	49,91	94%
1881,90	4,90	53,20	2,27	50,93	96%
1881,77	4,80	53,07	3,16	49,91	94%
1881,77	4,90	53,07	2,14	50,93	96%
1881,68	4,80	52,98	3,07	49,91	94%
1881,68	4,80	52,98	3,07	49,91	94%
1881,68	4,80	52,98	3,07	49,91	94%
1881,68	4,80	52,98	3,07	49,91	94%
1881,56	4,80	52,86	2,95	49,91	94%
1881,56	4,80	52,86	2,95	49,91	94%
1881,56	4,80	52,86	2,95	49,91	94%
1881,42	4,70	52,72	3,83	48,89	93%
1881,42	4,70	52,72	3,83	48,89	93%
1881,42	4,70	52,72	3,83	48,89	93%
1881,29	4,80	52,59	2,68	49,91	95%
1881,29	4,80	52,59	2,68	49,91	95%
1881,00	4,70	52,30	3,41	48,89	93%
1881,00	4,70	52,30	3,41	48,89	93%
1880,89	4,70	52,19	3,30	48,89	94%
1880,89	4,70	52,19	3,30	48,89	94%
1880,77	4,70	52,07	3,18	48,89	94%
1880,72	4,70	52,02	3,13	48,89	94%
1880,72	4,70	52,02	3,13	48,89	94%
1880,62	4,60	51,92	4,05	47,87	92%
1880,62	4,60	51,92	4,05	47,87	92%
1880,56	4,70	51,86	2,97	48,89	94%
1880,50	4,70	51,80	2,91	48,89	94%
1880,50	4,70	51,80	2,91	48,89	94%
1880,44	4,60	51,74	3,87	47,87	93%
1880,35	4,70	51,65	2,76	48,89	95%
1880,35	4,60	51,65	3,78	47,87	93%

1879,77	4,60	51,07	3,20	47,87	94%
1879,27	4,60	50,57	2,70	47,87	95%
1879,27	4,60	50,57	2,70	47,87	95%
1879,16	4,60	50,46	2,59	47,87	95%
1878,64	4,20	49,94	6,15	43,79	88%
1878,55	4,50	49,85	3,00	46,85	94%
1878,35	4,40	49,65	3,82	45,83	92%
1878,35	4,50	49,65	2,80	46,85	94%
1878,26	4,60	49,56	1,69	47,87	97%
1878,20	4,50	49,50	2,65	46,85	95%
1878,20	4,60	49,50	1,63	47,87	97%
1878,02	4,60	49,32	1,45	47,87	97%
1877,78	4,40	49,08	3,25	45,83	93%
1877,78	4,40	49,08	3,25	45,83	93%
1877,57	4,40	48,87	3,04	45,83	94%
1877,47	4,40	48,77	2,94	45,83	94%
1876,35	4,30	47,65	2,84	44,81	94%
1876,17	4,30	47,47	2,66	44,81	94%
1876,11	4,30	47,41	2,60	44,81	95%
1876,11	4,30	47,41	2,60	44,81	95%
1876,04	4,30	47,34	2,53	44,81	95%
1875,79	4,40	47,09	1,26	45,83	97%
1876,07	4,30	47,37	2,56	44,81	95%
1875,84	4,30	47,14	2,33	44,81	95%
1875,84	4,20	47,14	3,35	43,79	93%
1875,77	4,30	47,07	2,26	44,81	95%
1875,83	4,20	47,13	3,34	43,79	93%
1875,94	4,20	47,24	3,45	43,79	93%
1875,93	4,30	47,23	2,42	44,81	95%
1877,67	4,40	48,97	3,14	45,83	94%
1878,23	4,20	49,53	5,74	43,79	88%
1878,23	4,20	49,53	5,74	43,79	88%
1878,23	4,50	49,53	2,68	46,85	95%
1878,71	4,60	50,01	2,14	47,87	96%
1878,71	4,60	50,01	2,14	47,87	96%
1878,86	4,60	50,16	2,29	47,87	95%
1878,86	4,60	50,16	2,29	47,87	95%
1878,86	4,60	50,16	2,29	47,87	95%
1879,20	4,60	50,50	2,63	47,87	95%
1879,20	4,60	50,50	2,63	47,87	95%

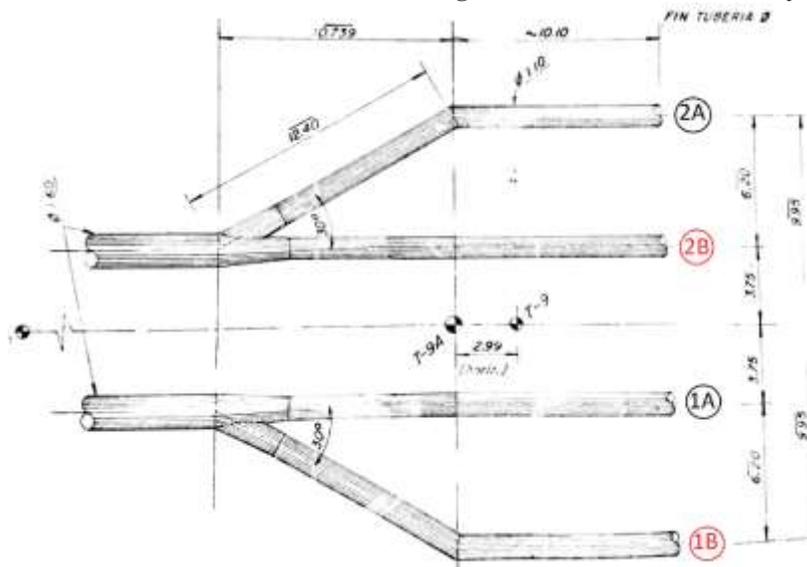
1879,24	4,60	50,54	2,67	47,87	95%
1879,24	4,60	50,54	2,67	47,87	95%
1879,53	4,60	50,83	2,96	47,87	94%
1879,92	4,60	51,22	3,35	47,87	93%
1879,92	4,60	51,22	3,35	47,87	93%
1879,92	4,60	51,22	3,35	47,87	93%
1879,92	4,60	51,22	3,35	47,87	93%

Fuente: Elaboración propia

Según se puede apreciar, la eficiencia del sistema hidráulico es en promedio y por lo general del **94%** para la turbina B del grupo 2.

De lo encontrado podemos mencionar que la mayor eficiencia encontrada en la turbina B del grupo 2, por lógica, se debe a que esta es de menor longitud, acortando con ello la pérdida por fricción y no posee la pérdida local adicional que representa la bifurcación que lleva según geometría de la tubería forzada el agua a la turbina 1B; según se puede apreciar en la figura 3.11.

Figura 3. 11 Visualización de las diferencias en geometría de las turbinas 1B y la turbina 2B



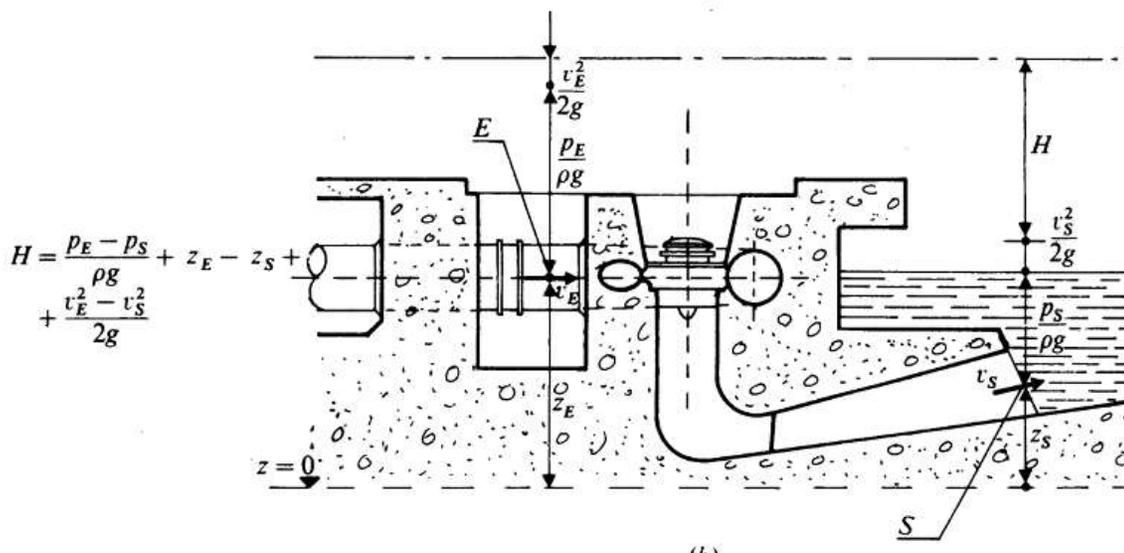
Fuente: Archivos del Proyecto Multiple San Jacinto

De todas maneras de manera *global* el sistema hidráulico de la central hidroeléctrica de San Jacinto presenta una *eficiencia media del 92%*.

3.4 ANALISIS DE LA ALTURA NETA EN LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE SAN JACINTO

Para el cálculo de la altura neta en la central hidroeléctrica de San Jacinto, se empleara el criterio de las Normas internacionales para los ensayos de las turbinas hidráulicas en las centrales hidroeléctricas, como lo es la *International Code fur Abnahmeversuche an Wasserturbinen in Kraftwerken. Springer. Berlin 1965*, la cual menciona para el caso de turbinas Francis que:

Figura 3. 12 Análisis de la altura neta



Fuente: Mataix. (2004). Mecanica de fluidos y maquinas hidraulicas. Mexico: Alfaomega

Entonces, aplicamos la ecuación de Bernoulli entre las secciones E (sección de entrada a la turbina) y la sección S (sección de salida de la turbina), tenemos entonces:

$$\frac{p_E}{\rho g} + z_E + \frac{v_E^2}{2g} - H = \frac{p_S}{\rho g} + z_S + \frac{v_S^2}{2g}$$

$$H = \left(\frac{p_E}{\rho g} + z_E + \frac{v_E^2}{2g} \right) - \left(\frac{p_S}{\rho g} + z_S + \frac{v_S^2}{2g} \right)$$

$$H = \frac{p_E - p_S}{\rho g} + z_E - z_S + \frac{v_E^2 - v_S^2}{2g}$$

Siendo:

$$\frac{v_S^2}{g} = 0 \quad \frac{p_S}{\gamma} = 0$$

Reacomodando la ecuación, tenemos que la **Altura Neta** es:

$$H = (Z_E - Z_S) + \frac{p_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{g}$$

Poniendo la ecuación de Altura Neta **H**, en función de caudal, sabiendo que el diámetro de la tubería a la llegada de la turbina es de 1,10 m, es así que la ecuación de para la altura neta, toma la siguiente forma, recordando que el nivel de los ejes de las tuberías a la llegada a las turbinas es de:

$$Z_T = 1828,70 \text{ msnm}$$

Y que el nivel de la sección al final del tubo de aspiración es:

$$Z_S = 1824,95 \text{ msnm}$$

Entonces:

De igual manera, procedemos al cálculo de las alturas netas para las turbinas en análisis, a saber la turbina 1B y la turbina 2B, según se aclaró y explico en la sección 1.5:

3.4.1 ANALISIS PARA TURBINA 1B

Según análisis realizado y aplicando la ecuación encontrada, tenemos que:

Tabla 3. 7 Altura neta turbina 1B

GRUPO N°1		
TURBINA "B"		
Nivel Embalse	Presión Entrada Bar	Salto Neto H_N (m)
1883,82	4,80	53,66
1883,82	4,80	53,66
1883,86	4,80	53,66
1883,86	4,80	53,66
1884,01	4,80	53,66
1884,01	4,80	53,66
1884,67	4,80	53,66
1884,07	4,80	53,66
1884,02	4,90	54,68
1884,02	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,02	4,80	53,66
1884,04	4,80	53,66
1884,02	4,80	53,66
1884,02	4,80	53,66
1884,02	4,80	53,66
1884,02	4,80	53,66
1884,02	4,90	54,68
1884,02	4,80	53,66
1884,00	4,80	53,66
1884,00	4,80	53,66
1883,99	4,80	53,66
1883,99	4,80	53,66
1884,04	4,80	53,66

1884,07	4,80	53,66
1884,24	4,80	53,66
1884,24	4,80	53,66
1884,04	4,80	53,66
1884,14	4,80	53,66
1884,21	4,80	53,66
1884,21	4,80	53,66
1884,21	4,80	53,66
1884,10	4,80	53,66
1884,10	4,80	53,66
1884,10	4,70	52,64
1884,04	4,80	53,66
1884,04	4,90	54,68
1884,09	4,80	53,66
1884,09	4,80	53,66
1884,07	4,90	54,68
1884,07	4,80	53,66
1884,07	4,80	53,66
1884,07	4,80	53,66
1884,12	4,80	53,66
1884,10	4,80	53,66
1884,10	4,80	53,66
1884,10	4,80	53,66
1884,10	4,80	53,66
1884,03	4,80	53,66
1884,03	4,80	53,66
1884,03	4,80	53,66
1884,03	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,07	4,80	53,66
1884,07	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,04	5,00	55,70
1884,04	4,80	53,66

1884,03	4,80	53,66
1884,03	4,80	53,66
1884,11	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,06	4,80	53,66
1884,02	4,80	53,66
1884,02	4,80	53,66
1884,02	4,80	53,66
1884,00	4,80	53,66
1884,00	4,80	53,66
1884,02	4,80	53,66
1884,02	4,80	53,66
1884,03	4,80	53,66
1884,03	4,80	53,66
1884,03	4,80	53,66
1884,02	4,80	53,66
1884,02	4,80	53,66
1884,01	4,80	53,66
1884,01	4,80	53,66
1883,99	4,80	53,66
1884,04	4,80	53,66
1884,04	4,80	53,66
1884,03	4,80	53,66
1883,98	4,80	53,66
1883,98	4,80	53,66
1883,99	4,90	54,68
1883,99	4,80	53,66
1883,98	4,80	53,66
1883,98	4,80	53,66
1883,97	4,80	53,66
1883,97	4,80	53,66
1883,96	4,80	53,66
1883,96	4,80	53,66
1883,94	4,80	53,66
1883,88	4,80	53,66
1883,88	4,80	53,66
1883,85	4,80	53,66
1883,81	4,80	53,66
1883,79	4,80	53,66
1883,79	4,80	53,66

1883,82	4,80	53,66
1883,82	4,80	53,66
1883,82	4,80	53,66
1883,82	4,80	53,66
1883,87	4,80	53,66
1883,86	4,80	53,66
1883,86	4,80	53,66
1883,82	4,80	53,66
1883,30	4,70	52,64
1883,30	4,70	52,64
1883,23	4,70	52,64
1883,14	4,70	52,64
1883,12	4,70	52,64
1883,05	4,70	52,64
1883,03	4,70	52,64
1883,03	4,70	52,64
1882,99	4,70	52,64
1882,99	4,70	52,64
1882,96	4,60	51,62
1882,72	4,60	51,62
1882,58	4,60	51,62
1882,58	4,60	51,62
1882,52	4,60	51,62
1882,52	4,60	51,62
1882,47	4,60	51,62
1882,32	4,60	51,62
1882,29	4,60	51,62
1882,29	4,60	51,62
1882,19	4,60	51,62
1882,19	4,60	51,62
1882,09	4,60	51,62
1882,09	4,60	51,62
1882,09	4,60	51,62
1882,09	4,60	51,62
1881,90	4,70	52,64
1881,90	4,60	51,62
1881,90	4,60	51,62
1881,77	4,60	51,62
1881,77	4,60	51,62
1881,68	4,60	51,62

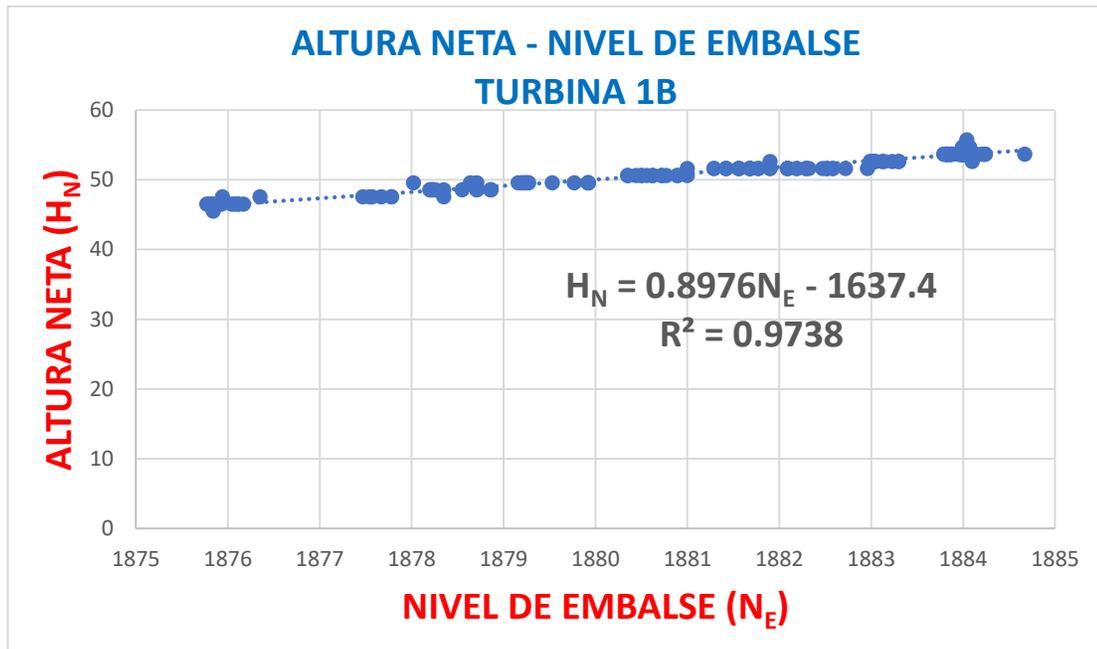
1881,68	4,60	51,62
1881,68	4,60	51,62
1881,68	4,60	51,62
1881,56	4,60	51,62
1881,56	4,60	51,62
1881,56	4,60	51,62
1881,42	4,60	51,62
1881,42	4,60	51,62
1881,42	4,60	51,62
1881,29	4,60	51,62
1881,29	4,60	51,62
1881,00	4,60	51,62
1881,00	4,50	50,60
1880,89	4,50	50,60
1880,89	4,50	50,60
1880,77	4,50	50,60
1880,72	4,50	50,60
1880,72	4,50	50,60
1880,62	4,50	50,60
1880,62	4,50	50,60
1880,56	4,50	50,60
1880,50	4,50	50,60
1880,50	4,50	50,60
1880,44	4,50	50,60
1880,35	4,50	50,60
1880,35	4,50	50,60
1879,77	4,40	49,58
1879,27	4,40	49,58
1879,27	4,40	49,58
1879,16	4,40	49,58
1878,71	4,40	49,58
1878,64	4,40	49,58
1878,55	4,30	48,56
1878,35	4,30	48,56
1878,35	4,20	47,54
1878,26	4,30	48,56
1878,20	4,30	48,56
1878,20	4,30	48,56
1878,02	4,40	49,58
1877,78	4,20	47,54

1877,78	4,20	47,54
1877,57	4,20	47,54
1877,47	4,20	47,54
1876,35	4,20	47,54
1876,17	4,10	46,52
1876,11	4,10	46,52
1876,11	4,10	46,52
1876,04	4,10	46,52
1875,79	4,10	46,52
1876,07	4,10	46,52
1875,84	4,10	46,52
1875,84	4,00	45,50
1875,77	4,10	46,52
1875,83	4,10	46,52
1875,94	4,20	47,54
1875,93	4,10	46,52
1877,54	4,20	47,54
1877,67	4,20	47,54
1878,23	4,30	48,56
1878,23	4,30	48,56
1878,23	4,30	48,56
1878,71	4,30	48,56
1878,71	4,30	48,56
1878,86	4,30	48,56
1878,86	4,30	48,56
1878,86	4,30	48,56
1879,20	4,40	49,58
1879,20	4,40	49,58
1879,24	4,40	49,58
1879,24	4,40	49,58
1879,53	4,40	49,58
1879,92	4,40	49,58
1879,92	4,40	49,58
1879,92	4,40	49,58
1879,92	4,40	49,58

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos podemos encontrar la ecuación que relaciona de manera directa al nivel de embalse con la altura neta disponible para la turbina 1B, dicha ecuación se la muestra en la figura 3.13:

Figura 3. 13 Relación entre altura neta y nivel de embalse turbina 1B



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente de este análisis, podemos mencionar que la altura neta promedio en la época de lluvia (enero, febrero, marzo y abril) para la turbina 1B es de **53,72 m.**

3.4.2 ANALISIS PARA TURBINA 2B

De igual manera que en caso anterior, encontramos la altura neta para diferentes niveles del embalse:

Tabla 3. 8 Altura neta turbina 2B

GRUPO N°2		
TURBINA "B"		
Nivel Embalse	Presión Entrada Bar	Salto Neto H_N (m)
1883,82	5,10	56,72
1883,82	5,00	55,70
1883,86	5,00	55,70
1883,86	5,00	55,70
1884,01	5,00	55,70
1884,01	5,00	55,70
1884,67	5,20	57,74
1884,07	4,80	53,66
1884,02	5,00	55,70
1884,02	5,00	55,70
1884,06	5,10	56,72
1884,06	5,00	55,70
1884,02	5,00	55,70
1884,04	4,90	54,68
1884,02	5,20	57,74
1884,02	4,90	54,68
1884,02	5,00	55,70
1884,02	5,10	56,72
1884,02	5,00	55,70
1884,00	4,90	54,68
1884,00	4,90	54,68
1883,99	4,90	54,68
1883,99	5,00	55,70
1884,04	4,90	54,68
1884,07	4,90	54,68
1884,24	5,00	55,70
1884,24	5,00	55,70
1884,04	5,00	55,70
1884,14	5,00	55,70

1884,21	4,90	54,68
1884,21	4,90	54,68
1884,21	4,90	54,68
1884,10	4,90	54,68
1884,10	4,90	54,68
1884,10	4,90	54,68
1884,04	5,00	55,70
1884,04	5,00	55,70
1884,09	5,10	56,72
1884,09	5,00	55,70
1884,07	5,00	55,70
1884,07	5,00	55,70
1884,07	5,00	55,70
1884,07	5,00	55,70
1884,12	5,10	56,72
1884,10	5,00	55,70
1884,10	5,00	55,70
1884,10	5,00	55,70
1884,10	5,00	55,70
1884,03	5,10	56,72
1884,03	5,00	55,70
1884,03	5,00	55,70
1884,03	5,00	55,70
1884,06	5,00	55,70
1884,06	5,00	55,70
1884,06	5,00	55,70
1884,06	5,00	55,70
1884,06	5,00	55,70
1884,06	5,00	55,70
1884,06	5,00	55,70
1884,06	5,00	55,70
1884,07	4,90	54,68
1884,07	4,90	54,68
1884,06	4,90	54,68
1884,06	5,00	55,70
1884,04	5,00	55,70
1884,04	5,00	55,70
1884,03	4,90	54,68
1884,03	4,90	54,68
1884,11	4,90	54,68
1884,06	5,00	55,70
1884,06	5,00	55,70

1884,02	4,90	54,68
1884,02	4,90	54,68
1884,02	4,90	54,68
1884,00	4,90	54,68
1884,00	4,90	54,68
1884,02	4,90	54,68
1884,02	4,90	54,68
1884,03	4,90	54,68
1884,03	4,90	54,68
1884,03	5,00	55,70
1884,02	5,00	55,70
1884,02	5,00	55,70
1884,01	5,00	55,70
1884,01	5,00	55,70
1883,99	5,00	55,70
1884,04	4,90	54,68
1884,04	4,90	54,68
1884,03	5,00	55,70
1883,98	5,00	55,70
1883,98	5,10	56,72
1883,99	5,10	56,72
1883,99	5,00	55,70
1883,98	4,90	54,68
1883,98	4,90	54,68
1883,97	5,00	55,70
1883,97	5,00	55,70
1883,96	5,00	55,70
1883,96	5,00	55,70
1883,94	5,00	55,70
1883,88	4,90	54,68
1883,88	4,90	54,68
1883,85	4,90	54,68
1883,81	4,90	54,68
1883,79	4,90	54,68
1883,79	4,90	54,68
1883,82	5,00	55,70
1883,82	5,00	55,70
1883,82	4,90	54,68
1883,82	4,90	54,68
1883,87	5,00	55,70

1883,86	5,00	55,70
1883,86	5,00	55,70
1883,82	5,00	55,70
1883,30	4,90	54,68
1883,30	4,90	54,68
1883,23	4,90	54,68
1883,14	4,90	54,68
1883,12	4,90	54,68
1883,05	4,90	54,68
1883,03	4,90	54,68
1882,99	4,80	53,66
1882,99	4,80	53,66
1882,96	4,80	53,66
1882,72	4,80	53,66
1882,58	4,80	53,66
1882,58	4,80	53,66
1882,52	4,80	53,66
1882,52	4,80	53,66
1882,47	4,80	53,66
1882,32	4,80	53,66
1882,29	4,80	53,66
1882,29	4,80	53,66
1882,19	4,80	53,66
1882,09	4,80	53,66
1882,09	4,80	53,66
1882,09	4,80	53,66
1882,09	4,80	53,66
1881,90	4,80	53,66
1881,90	4,80	53,66
1881,90	4,90	54,68
1881,77	4,80	53,66
1881,77	4,90	54,68
1881,68	4,80	53,66
1881,68	4,80	53,66
1881,68	4,80	53,66
1881,68	4,80	53,66
1881,56	4,80	53,66
1881,56	4,80	53,66
1881,56	4,80	53,66
1881,42	4,70	52,64

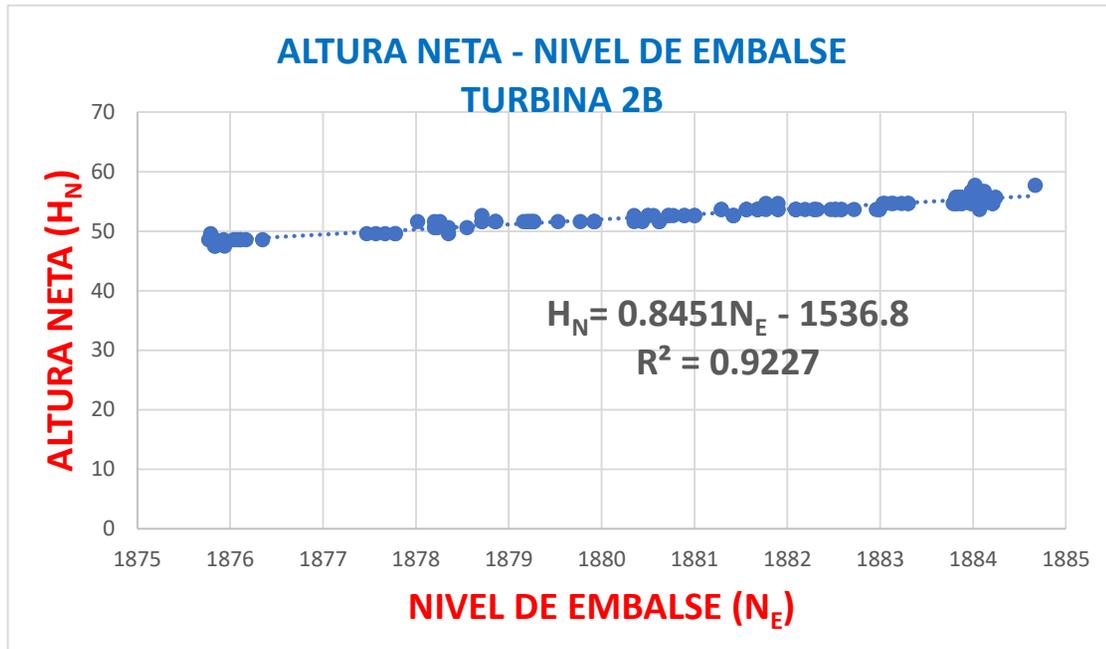
1881,42	4,70	52,64
1881,42	4,70	52,64
1881,29	4,80	53,66
1881,29	4,80	53,66
1881,00	4,70	52,64
1881,00	4,70	52,64
1880,89	4,70	52,64
1880,89	4,70	52,64
1880,77	4,70	52,64
1880,72	4,70	52,64
1880,72	4,70	52,64
1880,62	4,60	51,62
1880,62	4,60	51,62
1880,56	4,70	52,64
1880,50	4,70	52,64
1880,50	4,70	52,64
1880,44	4,60	51,62
1880,35	4,70	52,64
1880,35	4,60	51,62
1879,77	4,60	51,62
1879,27	4,60	51,62
1879,27	4,60	51,62
1879,16	4,60	51,62
1878,71	4,70	52,64
1878,55	4,50	50,60
1878,35	4,40	49,58
1878,35	4,50	50,60
1878,26	4,60	51,62
1878,20	4,50	50,60
1878,20	4,60	51,62
1878,02	4,60	51,62
1877,78	4,40	49,58
1877,78	4,40	49,58
1877,57	4,40	49,58
1877,47	4,40	49,58
1876,35	4,30	48,56
1876,17	4,30	48,56
1876,11	4,30	48,56
1876,11	4,30	48,56
1876,04	4,30	48,56

1875,79	4,40	49,58
1876,07	4,30	48,56
1875,84	4,30	48,56
1875,84	4,20	47,54
1875,77	4,30	48,56
1875,83	4,20	47,54
1875,94	4,20	47,54
1875,93	4,30	48,56
1877,67	4,40	49,58
1878,23	4,50	50,60
1878,71	4,60	51,62
1878,71	4,60	51,62
1878,86	4,60	51,62
1878,86	4,60	51,62
1878,86	4,60	51,62
1879,20	4,60	51,62
1879,20	4,60	51,62
1879,24	4,60	51,62
1879,24	4,60	51,62
1879,53	4,60	51,62
1879,92	4,60	51,62
1879,92	4,60	51,62
1879,92	4,60	51,62
1879,92	4,60	51,62

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos podemos encontrar la ecuación que relaciona de manera directa al nivel de embalse con la altura neta disponible para la turbina 2B, dicha ecuación se la muestra en la figura 3.14:

Figura 3. 14 Relación entre altura neta y nivel de embalse turbina 2B



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente de este análisis, podemos mencionar que la altura neta promedio en la época de lluvia (enero, febrero, marzo y abril) para la turbina 2B es de **55,44 m**.

3.5 VERIFICACION DEL RANGO DE EXPLOTACION DE LAS TURBINAS FRANCIS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE SAN JACINTO

Según se indicó en la sección 1.5 de presente trabajo, la verificación del rango de explotación de las turbinas Francis de la central hidroeléctrica, se lo realizara solamente en su rango superior, esto debido a que fue en este rango donde posiblemente se vería la influencia en el incremento de la altura neta, ocasionado por la adición de la altura de las presas inflables que operan desde 1996 y que no fue contemplado en el diseño original de las turbinas, con referencia al rango inferior, todas las variables se mantienen

igual que en el análisis que se realizó para cuando se diseñaron las turbinas, en consecuencia no serán sometidos a análisis alguno.

El rango de explotación seguro de las turbinas vienen definidos por el fabricante y son proporcionados mediante el diagrama colinar de las turbinas, dentro del cual se encuentran el mencionado rango seguro de explotación de las turbinas y dentro del cual el fabricante garantiza el adecuado funcionamiento de las turbinas; adicionalmente a eso, se encuentra información adicional como: área de eficiencia de las turbinas y su potencia; todo esto en función a la altura neta y el caudal.

Para el caso de las turbinas Francis de la central hidroeléctrica de San Jacinto su diagrama colinar proporcionado por el fabricante Voith es el mostrado en la figura 4.15, del cual se harán las verificaciones en esta tesis.

Para la verificación de los rangos de explotación de las turbinas Francis en análisis, o sea la turbina 1B y la turbina 2B, analizaremos la altura neta promedio en la época lluviosa, pues como se evidencio en análisis anteriores, en esta época es donde la central hidroeléctrica tiene un aporte importante en la producción anual de energía.

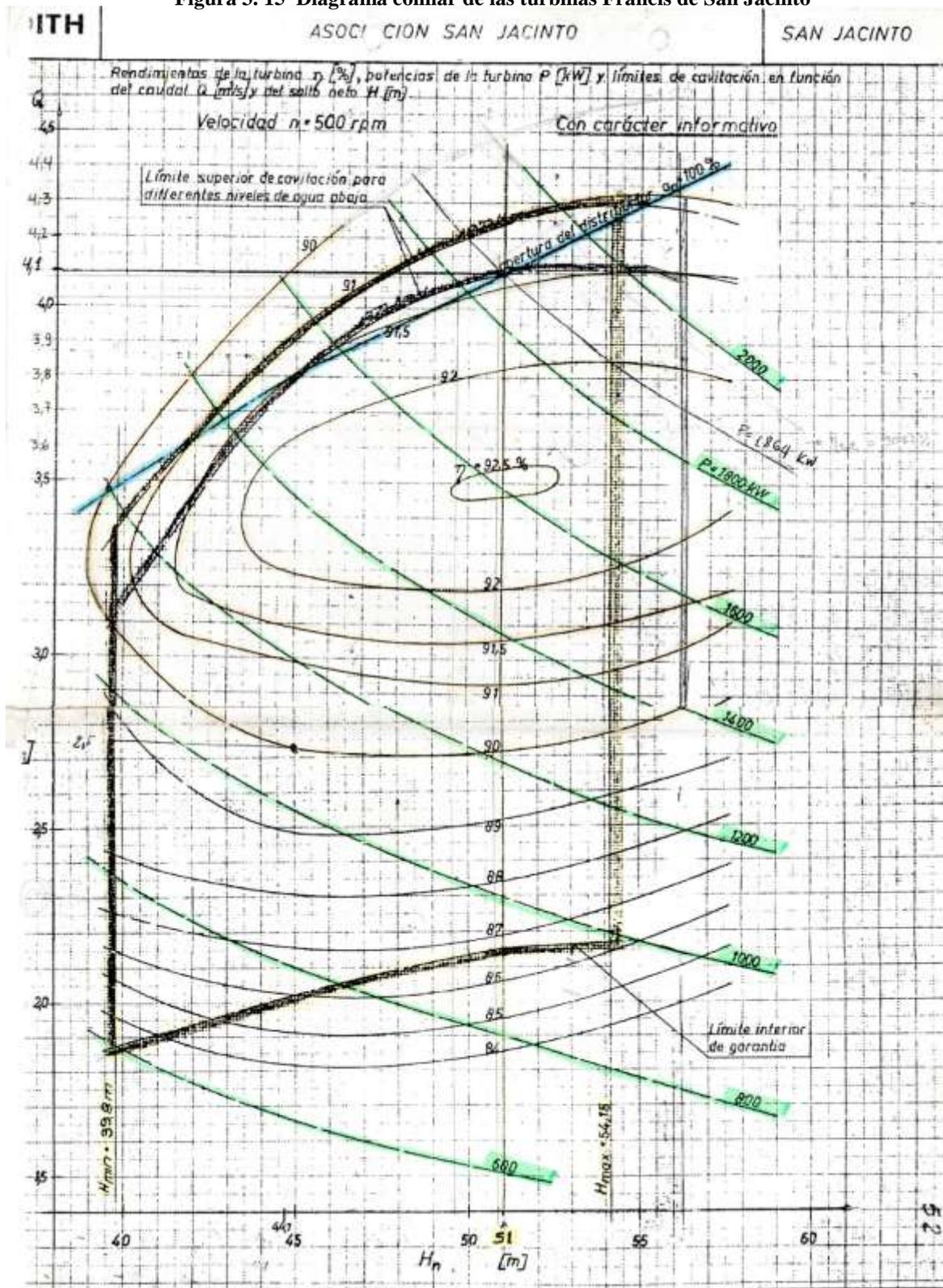
3.5.1 VERIFICACION DEL RANGO DE EXPLOTACION DE LAS TURBINAS FRANCIS EN PERIODO LLUVIOSO

Se realizará el análisis para las turbinas en cuestión, a saber la turbina 1B y la turbina 2B:

3.5.1.1 Turbina 1B

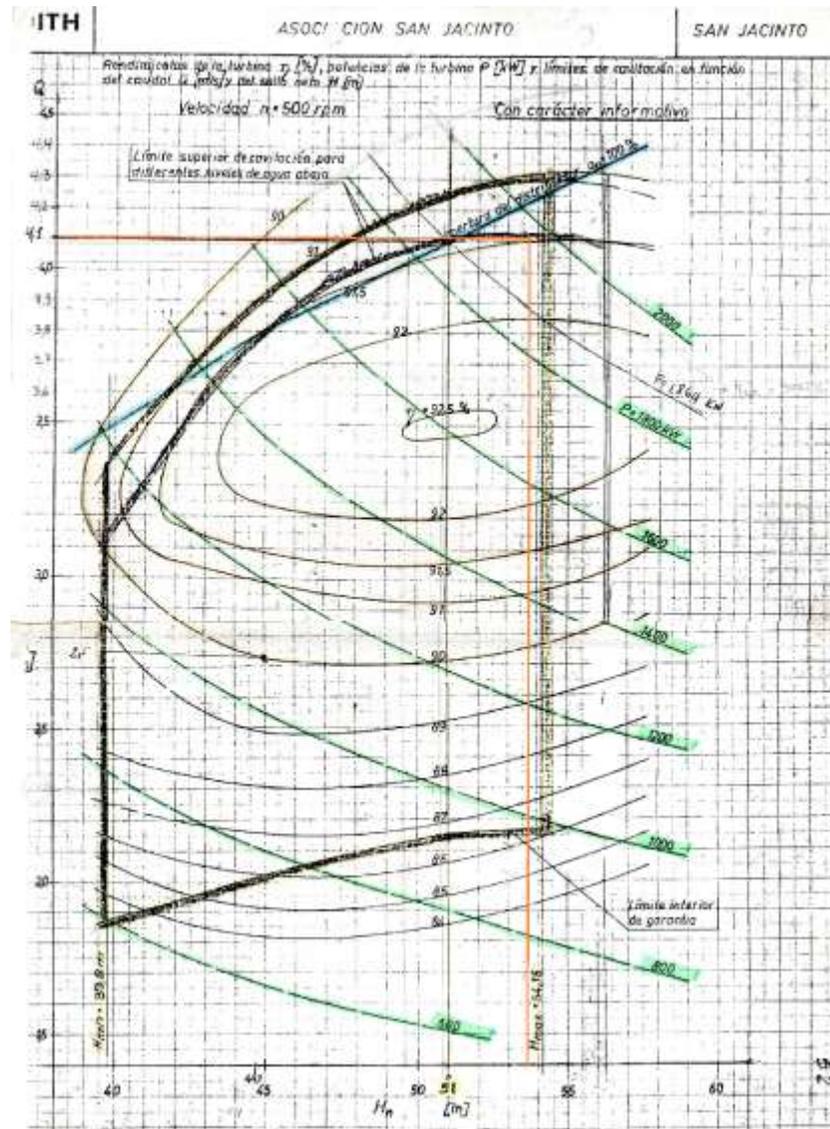
Según el análisis realizado para la cuantificación de las alturas netas en las turbinas, se dedujo que el salto neto promedio en época lluviosa es 53,72 m; con este dato y el caudal nominal de la turbinas de 4,1 m³/s (el cual también fue validado en las pruebas de aforo realizadas en el día de prueba en la central hidroeléctrica de San Jacinto), entrando al diagrama tenemos lo siguiente:

Figura 3.15 Diagrama colinar de las turbinas Francis de San Jacinto



Fuente: Archivos del Proyecto Multiple San Jacinto

Figura 3. 16 Evaluación del rango de explotación de la turbina 1B



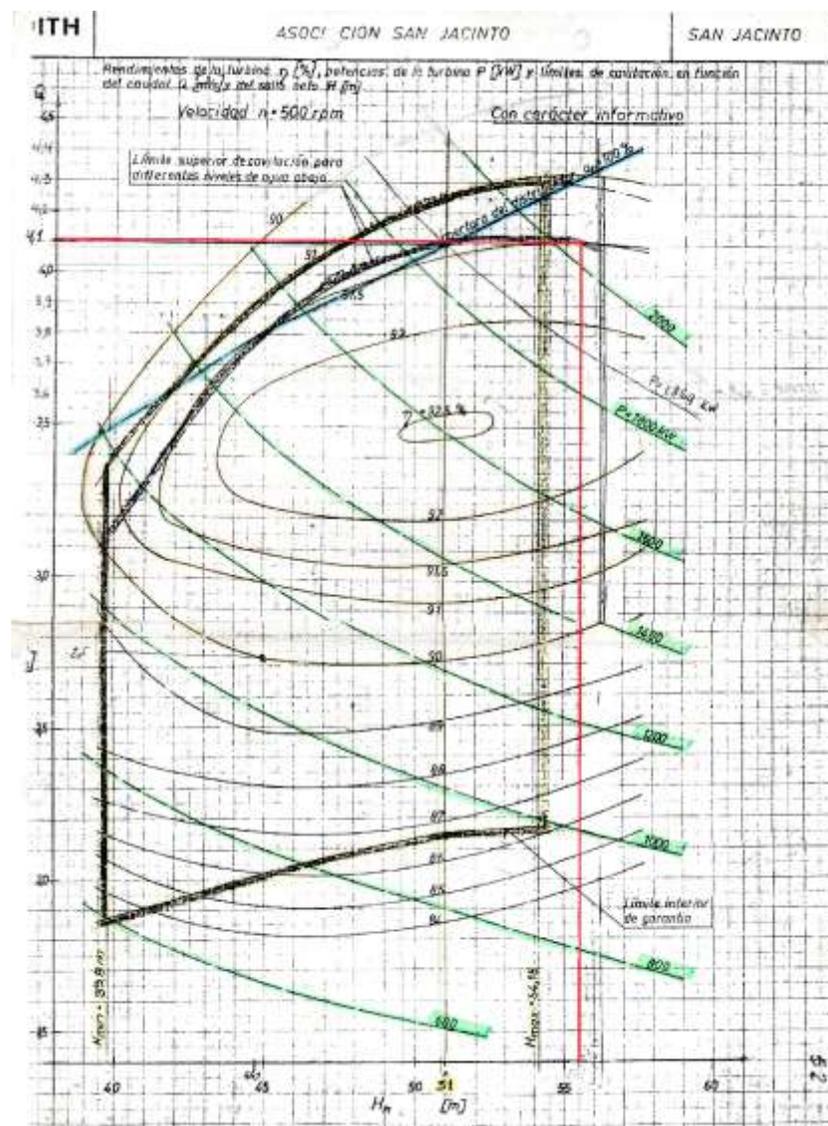
Fuente: Elaboración propia

De lo cual deducimos, que la turbina 1B, se encuentra dentro del rango de explotación garantizada por el fabricante, además de evidenciarse que la turbina trabajara con una eficiencia del 91,5% y que la potencia a generar por dicha turbina será cercana a los 2000 KW

3.5.1.2 Turbina 2B

Según el análisis realizado para la cuantificación de las alturas netas en las turbinas, se dedujo que el salto neto promedio para esta turbina en época lluviosa es 55,44 m; con este dato y el caudal nominal de la turbinas de 4,1 m³/s (el cual también fue validado en las pruebas de aforo realizadas en el día de prueba en la central hidroeléctrica de San Jacinto), entrando al diagrama tenemos lo siguiente:

Figura 3. 17 Evaluación del rango de explotación de la turbina 2B



Fuente: Elaboración propia

De lo cual deducimos, que la turbina 2B, se encuentra fuera del rango de explotación garantizada por el fabricante, además de evidenciarse que la turbina trabajara con una eficiencia del 91,5% y que la potencia a generar por dicha turbina será ligeramente superior a los 2000 KW

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Revisada toda la información, el procesamiento de los datos y análisis de los mismos, podemos concluir que:

- En promedio el 65% de la producción de energía anual en la central hidroeléctrica de San Jacinto, se genera en los meses de enero, febrero, marzo y abril.
- La central hidroeléctrica de San Jacinto, no está siendo operada con el criterio de eficiencia, pues según se demostró existen años donde el potencial del recurso hídrico disponible en el embalse es alto, sin embargo la producción energética de la central es mínimo.
- La eficiencia encontrada para el sistema hidráulico que llega a la turbina 1B es de **90%**, y por simetría correspondería también a la eficiencia hidráulica de la turbina 2A.
- La eficiencia encontrada para el sistema hidráulico que llega a la turbina 2B es de **94%**, y por simetría correspondería también a la eficiencia hidráulica de la turbina 1A.
- Realizada la evaluación del funcionamiento del sistema hidráulico construido y luego de 26 años de funcionamiento, el mismo presenta, una eficiencia promedio global del **92%**.

- También podemos mencionar que luego de la evaluación del funcionamiento del sistema hidráulico construido, evidenciamos que se cumple la hipótesis de diseño, la cual preveía una eficiencia del sistema hidráulico global también del **92%** (según se ve en la sección 3.3.1.2), siendo según se comentó anteriormente la eficiencia hidráulica actual también del **92%**.
- El aporte más importante realizado en esta investigación es la calibración de las ecuaciones siguientes:

Para turbina 1B (y por simetría valida también para la turbina 2A):

$$H_N = 0.8976N_E - 1637.4$$

Para la turbina 2B (y por simetría valida también para la turbina 1A):

$$H_N = 0.8451N_E - 1536.8$$

Con estas ecuaciones los operadores de la central hidroeléctrica de San Jacinto, sabrán de manera directa cual es la altura neta para las turbinas, con solo tener el dato del nivel de agua en el embalse.

- La altura neta promedio en la época de lluvia (enero, febrero, marzo y abril) es:
 - Para turbina 1B (y por simetría igual para la turbina 2A) es de **53.72 m**
 - Para turbina 2B (y por simetría igual para la turbina 1A) es de **55.44 m**
- En la verificación del rango de explotación de las turbinas Francis pudimos verificar que:
 - Para la turbina 1B y por simetría también la turbina 2A, el trabajo de estas turbinas en el periodo de lluvia, o sea donde tendrán la altura

neta máxima, se encuentra dentro del rango de explotación asegurado por el fabricante.

- Para la turbina 2B y por simetría también la turbina 1A, el trabajo de estas turbinas en el periodo de lluvia, o sea donde tendrán la altura neta máxima, se encuentra **fuera** del rango de explotación asegurado por el fabricante; efecto ocasionado por el incremento de la altura bruta, debido a la implementación de las presas inflables.

4.2 RECOMENDACIONES

Se recomiendo lo siguiente:

- Realizar un estudio para identificar cual sería la metodología óptima de operación del embalse de San Jacinto considerando la eficiencia técnica de las unidades de generación, de manera que se pueda optimizar el uso de la central hidroeléctrica y en consecuencia maximizar sus beneficios.
- Para el fin anterior, se deberán contar con mediciones exactas de caudales utilizados por cada turbina, según el régimen de trabajo a las que fueran sometidas las mismas. Dicho parámetro no se mide actualmente en la central hidroeléctrica de San Jacinto, es por eso que se recomienda la instalación de medidores de caudal como los caudalímetros no-intrusivos de FLEXIM que a nuestro criterio representan la mejor solución para estas tuberías tan grandes. Ya que se enganchan simplemente en el exterior de la pared de la tubería, no son necesarios cortes ni soldaduras, mientras que el dispositivo de montaje robusto de acero inoxidable y los transductores IP68 soportan incluso los ambientes más gravosos.

Estos nuevos dispositivos de miden el caudal bidireccional, de manera fiable y precisa, con una gama de medición virtualmente ilimitada, la instalación y

configuración del sistema de medición clamp-on sin intervenciones invasivas en las tuberías y riesgo de pérdidas, prácticamente libre de desgaste y consumo. Esta alternativa es muy económica en comparación a la instrumentación en húmedo como los dispositivos inductivos magnéticos.

- Como se evidencio que las turbinas 2B y la turbina 1A trabajan fuera del rango superior recomendado por el fabricante, es necesario que después que cada periodo de lluvia, se realice mantenimiento a los rodete de dichas turbinas, realizando en ellos el ensayos de tipo no destructivos, como por ejemplo ***la inspección por líquidos penetrantes***, el cual se utiliza para detectar e identificar discontinuidades presentes en la superficie del material analizado.

