



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA ELÉCTRICA

**CONSIDERACIONES GENERALES PARA LA SELECCIÓN DE
EQUIPOS Y MATERIALES ELÉCTRICOS EN LA ETAPA DE DISEÑO
DE GRANDES CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES

PRESENTA:

ING. RODRIGO TAFOLLA RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESINA: ING. FRANCISCO CUEVAS ARTEAGA

MÉXICO, D.F. OCTUBRE 2017

ÍNDICE

LISTAS DE FIGURAS, TABLAS Y GRÁFICAS.....	v
LISTA DE DIBUJOS.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	vii
CAPÍTULO I: CENTRALES HIDROELÉCTRICAS Y SUS COMPONENTES	
1.1. Generalidades.....	10
1.1.1. Energías renovables.....	11
1.2. Energía Hidráulica.....	13
1.2.1. Componentes Hidroeléctricos.....	13
1.3. Clasificación de las Centrales Hidroeléctricas.....	16
1.4. Equipos Principales de Generación.....	17
1.5. Equipos Principales de Transformación y Transmisión.....	18
1.5.1. Transformadores de potencia.....	18
1.5.2. Subestación Eléctrica.....	19
CAPÍTULO II: PRINCIPALES ETAPAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA	
2.1. Principales etapas de un Proyecto Hidroeléctrico.....	20
2.2. Planeación de un Proyecto Hidroeléctrico.....	21
2.2.1. Estudio Económico.....	22
2.2.2. Estudio Hidrológico.....	22
2.2.3. Estudio Topográfico y Cartográfico.....	23
2.2.4. Estudio Geológico y Geotécnico.....	24
2.2.5. Estudios Ambientales.....	25
CAPÍTULO III: CONSIDERACIONES GENERALES PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS Y MATERIALES ELÉCTRICOS	
3.1. Selección de Materiales y Equipos.....	26
3.2. Interrelación entre Ingenierías.....	27
3.2.1. Coordinación con ingeniería Civil.....	27
3.2.2. Coordinación con ingeniería Hidráulica.....	27
3.2.3. Coordinación con ingeniería Mecánica.....	27
3.2.4. Coordinación con ingeniería Eléctrica.....	28
3.3. Equipos y Materiales Eléctricos.....	28
3.3.1. Casa de Máquinas.....	30
3.3.1.1. Generador Eléctrico.....	31

3.3.1.2.	Bus de Generador.....	34
3.3.1.3.	Transformador de Potencia.....	35
3.3.1.4.	Servicios Auxiliares.....	38
3.3.1.5.	Sistema de Alumbrado.....	40
3.3.1.6.	Sistema de Tierras.....	40
3.3.1.7.	Sistema de protección, Control y Medición.....	41
3.3.2.	Subestación Eléctrica.....	41
3.3.2.1.	Por su Función.....	42
3.3.2.2.	Por su nivel de Tensión.....	42
3.3.2.3.	Por su tipo de Aislamiento.....	43
3.3.2.4.	Impacto económico de la subestación en un proyecto hidroeléctrico..	44
3.3.3.	Línea de Transmisión.....	46

CAPÍTULO IV: BENEFICIOS DE UNA SELECCIÓN ADECUADA DE MATERIALES Y EQUIPOS EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

4.1.	<i>Aspecto Económico.....</i>	48
4.2.	<i>Diferentes aspectos para economizar el proyecto.....</i>	49
4.3.	<i>Reducción de costos en la Selección de Materiales y Equipos Eléctricos en Grandes Centrales Hidroeléctricas.....</i>	49
4.4.	<i>Distribución de Costos en Grandes Centrales Hidroeléctricas.....</i>	62
4.5.	<i>Resumen de los Beneficios obtenidos con una correcta selección de Materiales y Equipos Eléctricos.....</i>	68
	CONCLUSIONES.....	69
	REFERENCIAS.....	70

LISTAS DE FIGURAS, TABLAS Y GRÁFICAS

Lista de Figuras

Figura 1. Generación de una Planta Hidroeléctrica.....	10
Figura 2. Capacidad instalada de fuentes de energía renovable en el mundo.....	12
Figura 3. Partes principales de una Central Hidroeléctrica.....	14
Figura 4. Selección del tipo de Turbina.....	18
Figura 5. Transformadores de Potencia al Exterior de Casa de Máquinas.....	19
Figura 6. Principales etapas en la construcción de Centrales Hidroeléctricas.....	20
Figura 7. Caudal Medio Anual.....	23
Figura 8. Topografía de la zona.....	24
Figura 9. Distribución típica en los componentes de una Central Hidroeléctrica....	29
Figura 10. Niveles en los que se distribuye Casa de Máquinas.....	30
Figura 11. Generador de Eje Vertical.....	32

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de Centrales Hidroeléctricas (1).....	16
Tabla 2. Clasificación de Centrales Hidroeléctricas (2).....	17
Tabla 3. Clasificación de los Niveles de Tensión.....	42
Tabla 4. Distribución de Costos en Grandes Centrales Hidroeléctricas.....	62

Lista de Gráficas

Gráfica 1. Distribución de costos en Grandes Centrales Hidroeléctricas.....	63
---	----

LISTA DE DIBUJOS

(1.a) Sistema Eléctrico de Potencia. Rodrigo Tafolla Ramírez.....	10
(1.b) Capacidad instalada de Energía Hidráulica en el mundo. World Energy.....	12
(1.c) Obras principales de una Central Hidroeléctrica. www.slideshare.net/proyecto-hidroelctrico-la-yesca-nay	14
(1.d) Selección del tipo de Turbina. Curso CFE.....	18
(1.e) Transformadores de Potencia. Rodrigo Tafolla Ramírez.....	19
(2.a) Principales etapas en un proyecto hidroeléctrico. Rodrigo Tafolla Ramírez....	20
(2.b) Caudal medio anual. Rodrigo Tafolla Ramírez.....	23
(2.c) Topografía. Rodrigo Tafolla Ramírez.....	24
(3.a) Distribución típica de componentes en una central. Andritz.....	29
(3.b) Niveles de Casa de Máquinas. Rodrigo Tafolla Ramírez.....	30
(3.c) Generador de Eje Vertical. Rodrigo Tafolla Ramírez.....	32
(3.d) Bus de Fase Aislada. www.crown-electric.com	34
(3.e) Bus de Fase Segregada www.crown-electric.com	34
(3.f) Transformador Trifásico. Rodrigo Tafolla Ramírez.....	35
(3.g) Transformador Monofásico. Rodrigo Tafolla Ramírez.....	35
(3.h) Subestación Convencional. www.periodicocontacto.com	43
(3.i) Subestación Encapsulada. ABB catálogo.....	43

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha tenido un crecimiento extraordinario en la población mundial ^[1], a causa de esto, el incremento en la demanda de energía eléctrica también se ha visto incrementado, por lo que se tiene una constante necesidad de construir nuevas fuentes de energía con la finalidad de satisfacer las necesidades de la población.

Actualmente el uso de combustibles fósiles es la fuente de generación de energía más utilizada a nivel mundial, llegando a ser cuestionada por las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que éstos generan, ocasionando problemas ambientales y climáticos. Por esta razón, se ha tenido la necesidad de reemplazar los hidrocarburos por energías renovables para la generación de energía eléctrica, siendo la energía hidroeléctrica la más utilizada.

En particular, las plantas hidroeléctricas requieren una gran cantidad de componentes y un estudio detallado en sus principales etapas de diseño. El propósito de esta tesina es mostrar la importancia de llevar a cabo una selección adecuada de los equipos y materiales que conforman las Grandes Centrales Hidroeléctricas, así como también se explican los beneficios que se obtienen con su selección adecuada ^[2].

Esta tesina fue realizada de acuerdo a experiencia en proyectos Hidroelétricos en el extranjero, pero se incluye información de carácter general para su utilización en México.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo de esta tesina es incluir las condiciones generales que se deben tener en cuenta para la selección de los equipos y materiales eléctricos, en su etapa de diseño, de Grandes Centrales Hidroeléctricas.

El enfoque se realiza a un nivel de ingeniería básica, indicando cada una de las características que afectan en esta etapa de diseño.

La selección adecuada de los equipos y materiales eléctricos que se deben seleccionar en cada proyecto deberán satisfacer las necesidades de cada instalación, proporcionando: seguridad, confiabilidad, continuidad y un beneficio económico.

JUSTIFICACIÓN

Con el paso del tiempo, la utilización de fuentes de energía no renovables ha perjudicado al medio ambiente provocando un avance acelerado en el cambio climático. Esto nos ha llevado a la necesidad de aprovechar uno de los recursos naturales más abundantes e importantes de nuestro planeta; el agua.

Para tener un beneficio en este tipo de energía renovable, es importante estudiar con detalle todas y cada una de las áreas de la ingeniería involucradas en cada proyecto. En esta tesina se mencionarán los conceptos esenciales que se deben tomar en cuenta durante la selección de equipos y materiales eléctricos de un proyecto hidroeléctrico, para obtener un diseño confiable y evitar pérdidas económicas.

METODOLOGÍA

Los métodos y procedimientos utilizados para el desarrollo de esta tesina son los siguientes:

- Procedimiento de investigación documental. Se realiza una búsqueda exhaustiva sobre los antecedentes generales, particulares, del Diseño de Grandes Centrales Hidroeléctricas, considerando los principales materiales y equipos que integran la Casa de Máquinas de una central, así como las prácticas de ingeniería y la normatividad aplicable.
- Método deductivo. Se toman como base las prácticas de ingeniería de casos reales, en varias partes del mundo, para el Diseño de Grandes Centrales Hidroeléctricas. Se realiza una investigación para planear la forma de obtener un diseño confiable y que brinde un beneficio económico.
- Método de análisis y síntesis. Se realiza un análisis de los materiales y equipos eléctricos que conforman el diseño de Grandes Centrales Hidroeléctricas, identificando sus características más relevantes.

CAPÍTULO I

CENTRALES HIDROELÉCTRICAS Y SUS COMPONENTES

1.1. Generalidades

El objetivo de todo sistema eléctrico de potencia es suministrar la energía necesaria para satisfacer de manera eficaz, confiable y segura la demanda de energía eléctrica para el desarrollo de un sector o país. Para lograr esto es necesario generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica desde las plantas de generación hasta los centros de carga [1].

En la Figura 1 se muestra un esquema con el proceso de generación de una Planta Hidroeléctrica hasta llegar a su consumo.

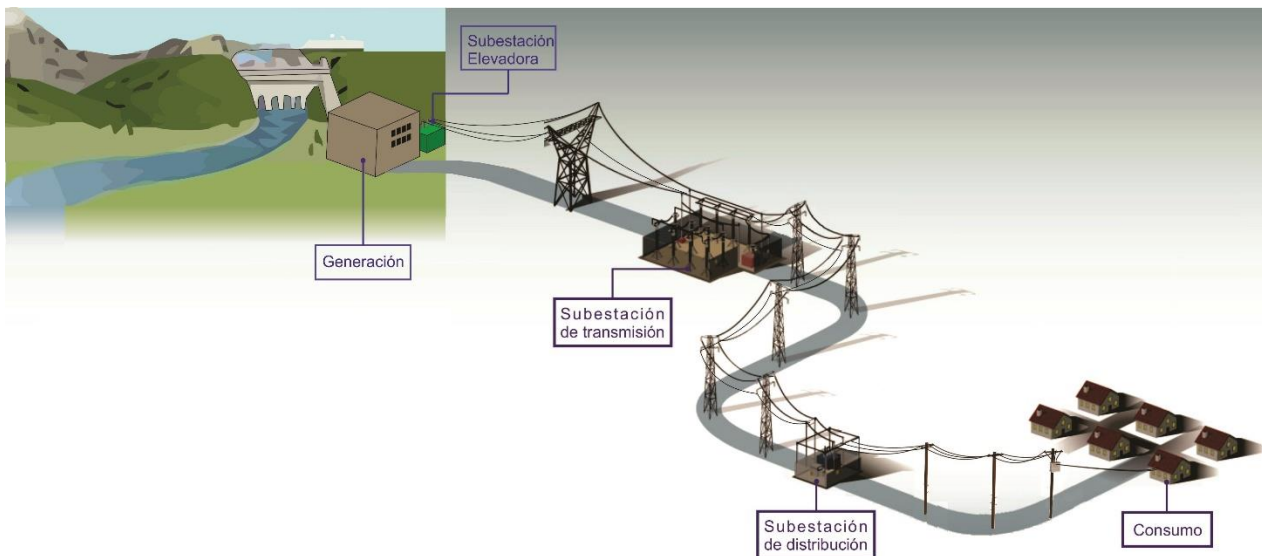


Figura 1. Generación de una Planta Hidroeléctrica (1.a).

1.1.1. Energías renovables

Son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana, ya que después ser utilizadas pueden regenerarse de manera natural o artificial [2].

Las principales formas de energías renovables son:

- **Energía Hidráulica.**
Generación por medio de Agua.
- **Energía Eólica.**
Generación por medio del viento.
- **Energía de Biomasa.**
Generación por medio de residuos orgánicos.
- **Energía Solar.**
Generación por medio de radiación solar.
- **Energía Geotérmica.**
Generación por medio del aprovechamiento del calor interno de la tierra.
- **Energía Mareomotriz.**
Generación por medio de las mareas.

La energía hidroeléctrica es la fuente renovable líder para la generación de electricidad a nivel mundial, suministrando el 71% de toda la electricidad renovable.

Hoy en día la generación de energía hidráulica contribuye en más del 16.4% de la generación de electricidad en todo el mundo [3] [4], lo cual representa un porcentaje significativo, pero sigue siendo un porcentaje muy pequeño si lo comparamos con la generación por medio de fuentes no renovables.

En la actualidad existe una gran conciencia mundial sobre el cuidado del medio ambiente y sobre los problemas que ocasiona la utilización de combustibles fósiles, sin embargo, el uso de energías renovables sigue siendo poco utilizado comparado con el uso de energías no renovables.

En la Figura 2 se muestra la capacidad de energía hidroeléctrica instalada, en el año 2016, en diferentes regiones del mundo [3].

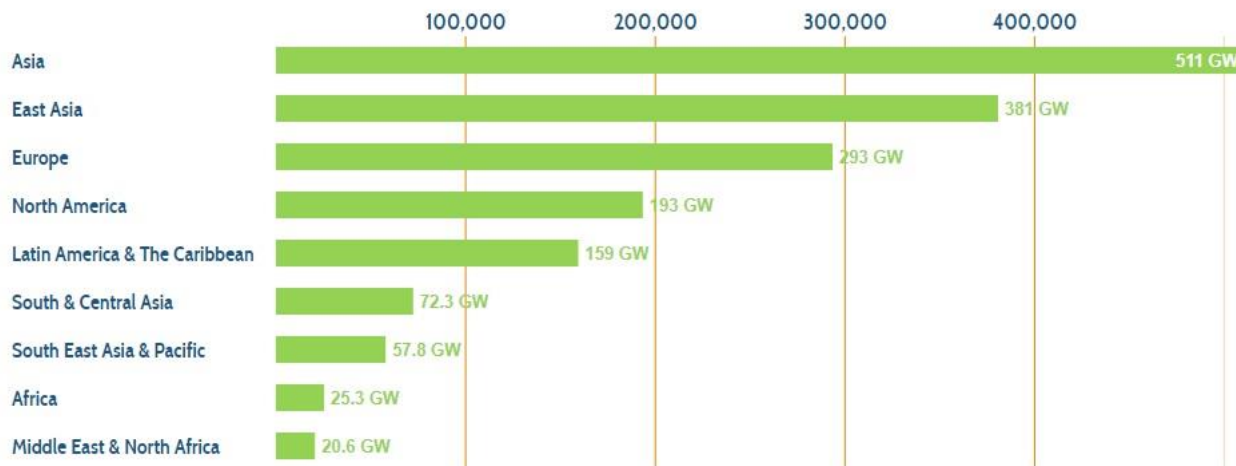


Figura 2. Capacidad instalada de energía hidráulica en el mundo. (1.b)

Algunas de las principales ventajas y desventajas de utilizar Centrales Hidroeléctricas para la generación de electricidad son las siguientes:

- **Ventajas:**

- Son energías limpias, es decir, son no contaminantes.
- Son renovables y no requiere de combustibles fósiles.
- Su mantenimiento es bajo.
- El uso de Centrales no es únicamente para Generación de electricidad, también son utilizadas para riego, manejo del río y suministro de agua para poblaciones cercanas.

- **Desventajas:**

- El tiempo de construcción es muy largo (aproximadamente 4 años).
- Los costos iniciales de su desarrollo son elevados.
- La generación de energía no es constante, es decir, varía dependiendo del régimen de lluvias y de las estaciones del año.
- Normalmente las Centrales están situadas en lugares lejanos. Esto eleva los costos por transporte y construcción.

A continuación se menciona de manera más detallada el proceso de generación de energía hidráulica y las partes que conforman las Centrales Hidroeléctricas.

1.2. Energía Hidráulica

La energía hidráulica se produce del aprovechamiento de agua almacenada como fuente primaria para generar electricidad. La energía potencial del agua es utilizada para hacer girar una turbina, y ésta a su vez, a través de una flecha, hacer girar un generador, el cual transforma la energía mecánica de la turbina en energía eléctrica.

1.2.1. Componentes Hidroeléctricos

Cada Central Hidroeléctrica es de características diferentes dependiendo del terreno y la zona donde se localizará, sin embargo, todas se conforman de las siguientes obras:

- Obra de Contención
 - Presa
 - Cortina
- Obra de Toma
- Obra de Desvío
- Obra de Excedencia
- Obra de Generación
 - Tubería de Presión (conducción)
 - Casa de Máquinas
 - Desfogue
 - Subestación elevadora

En la Figura 3 y en la Figura 9 se indican las obras principales de una Central hidroeléctrica.



Figura 3. Obras Principales de una Central Hidroeléctrica. (1.c)

- **Obra de Contención**

Presa.- Obra utilizada para contener el agua de un río en su embalse. La construcción de la presa permite almacenar el agua a diferentes niveles (caídas de operación) para su aprovechamiento. Los niveles de aprovechamiento se clasifican de la siguiente manera:

- NAME (Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias)
- NAMO (Nivel de Aguas Máximas Ordinarias)
- Nivel de Diseño
- NAMINO (Nivel de Aguas Mínimas de Operación)
- Nivel de Obra de Toma
- NDESF (Nivel en el Desfogue)

Cortina.- Construcción que forma parte de la presa y que es utilizada para la retención del agua. Los materiales y el tipo de cortina dependerán de las características de cada proyecto.

- **Obra de Toma**

Obra que permite regular y dar salida al agua retenida en el embalse. El caudal de diseño de la obra de toma debe determinarse tomando en consideración el caudal máximo de operación de las turbinas hidráulicas, para lo cual es necesario verificar cuál es el caudal máximo de operación de las turbinas hidráulicas bajo las caídas netas de operación.

- **Obra de Excedencia**

Construcción a nivel del caudal máximo posible en la presa. Es utilizado para controlar el nivel de excedencias de agua en la presa y puede ser de dos tipos:

- Libre
- Controlado por compuertas

- **Obra de Desvío**

Son obras realizadas previamente a la construcción de la presa. Se conforma por ataguías aguas arriba y aguas abajo para contener y desviar el caudal del río, y así poder iniciar con el proceso de construcción.

- **Obra de Generación**

Tubería de Presión.- También llamada tubería forzada, es aquella que conduce el agua hasta la turbina.

Casa de Máquinas.- Edificio en donde se ubican equipos de generación, supervisión y control, oficinas, etc.

Dependiendo de las características de la zona donde se localizará el proyecto, la Casa de Máquinas puede ser de tres tipos ^[5]:

Tipo A: Superficie convencional (interior, exterior, semi-interior, etc.).

Tipo B: Subterránea (pozo o caverna).

Tipo C: Pozos (generalmente para el tipo re-bombeo).

Desfogue.- Obra por la cual regresa el agua al río, después de pasar por el proceso de generación.

Subestación elevadora.- Su función principal es elevar las tensiones de salida de las unidades generadoras, de un nivel de media tensión, a un nivel de alta o extra alta tensión para transmitir la carga que es generada.

1.3. Clasificación de las Centrales Hidroeléctricas

Existen varias clasificaciones de las Centrales Hidroeléctricas de acuerdo a su capacidad de generación instalada. Su clasificación varía dependiendo de cada país, región o fabricante. En la Tabla 1 y Tabla 2 se muestran las clasificaciones más comunes para Centrales Hidroeléctricas, siendo la clasificación más común en México la indicada en la Tabla 2.

- **Tabla 1. Clasificación de Centrales Hidroeléctricas. (1) ^[6]**

Clasificación	Capacidad
Microcentrales	0 - 100 kW
Minicentrales	100 - 1 000 kW
Pequeñas Centrales	1 000 - 10 000 kW
Grandes Centrales	Mayores a 10 000 kW

- **Tabla 2. Clasificación de Centrales Hidroeléctricas. (2)** ^[7]

Clasificación	Capacidad
Microcentrales	0 - 50 kW
Minicentrales	50 - 500 kW
Pequeñas Centrales	500 – 5 000 kW
Medianas Centrales	5 000 - 30 000 kW
Grandes Centrales	Mayores a 30 000 kW

1.4. Equipos Principales de Generación

Existen varios equipos electromecánicos que tienen un papel importante durante el proceso de Generación de Energía Eléctrica, sin embargo, hay dos equipos principales muy importantes que son la base principal de cada proyecto, y que su selección deberá brindar confiabilidad, eficiencia y ahorro.

- Turbina
- Generador

La turbina debe seleccionarse tomando en cuenta las condiciones hidráulicas del sitio donde se realizará el proyecto y conociendo el caudal medio aprovechable.

Es importante considerar la caída o altura (la diferencia de elevación entre la superficie del agua en el embalse, aguas arriba, y la superficie de agua en el desfogue, aguas bajo), para definir el tipo de turbina que proporcione mayor eficiencia de acuerdo a las condiciones del sitio, así como la potencia de diseño.

Los tipos de Turbina más utilizados, de acuerdo a sus alturas/niveles de operación y caudales, son:

- Turbina Kaplan
- Turbina Francis
- Turbina Pelton

En la Figura 4 se muestra la gráfica de un fabricante de turbinas para tener una aproximación del tipo de Turbina a utilizar.

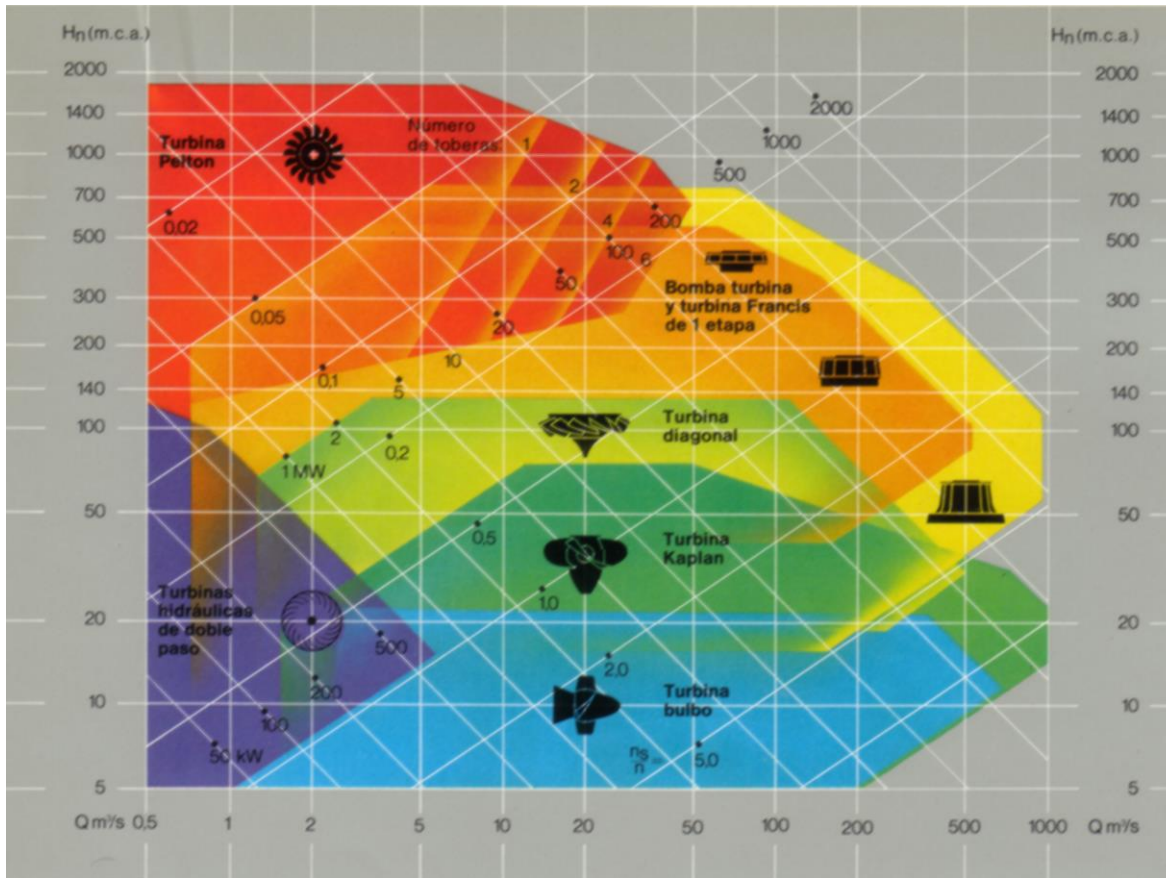


Figura 4. Selección del tipo de Turbina. (1.d)

La selección incorrecta de un tipo de Turbina podría ocasionar grandes pérdidas en la generación del proyecto, ya que la selección del Generador Eléctrico dependerá de las características de la Turbina que se seleccione. Por esta razón, es importante que la selección de la Turbina se realice de manera precisa.

1.5. Equipos Principales de Transformación y Transmisión

1.5.1. Transformadores de Potencia

Son equipos utilizados para regular el voltaje en el lado de baja y de alta tensión, manteniendo los niveles de tensión dentro de límites de operación seguros para lograr una operación adecuada del sistema eléctrico [1].

En la Figura 5 se muestran los transformadores de Potencia ubicados al exterior de Casa de Máquinas.



Figura 5. Transformadores de Potencia al exterior de Casa de Máquinas. (1.e)

1.5.2. Subestación Eléctrica

Una Subestación Eléctrica se conforma por un conjunto de equipos como (transformadores de potencia, apartarrayos, interruptores, transformadores de instrumento, cuchillas), instalaciones y dispositivos eléctricos, cuya operación en conjunto permiten la interconexión de la Central al sistema eléctrico. Sus funciones principales son: transformar, distribuir, controlar y medir la energía eléctrica de un sistema [1].

CAPÍTULO II

PRINCIPALES ETAPAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

2.1. Principales etapas de un Proyecto Hidroeléctrico

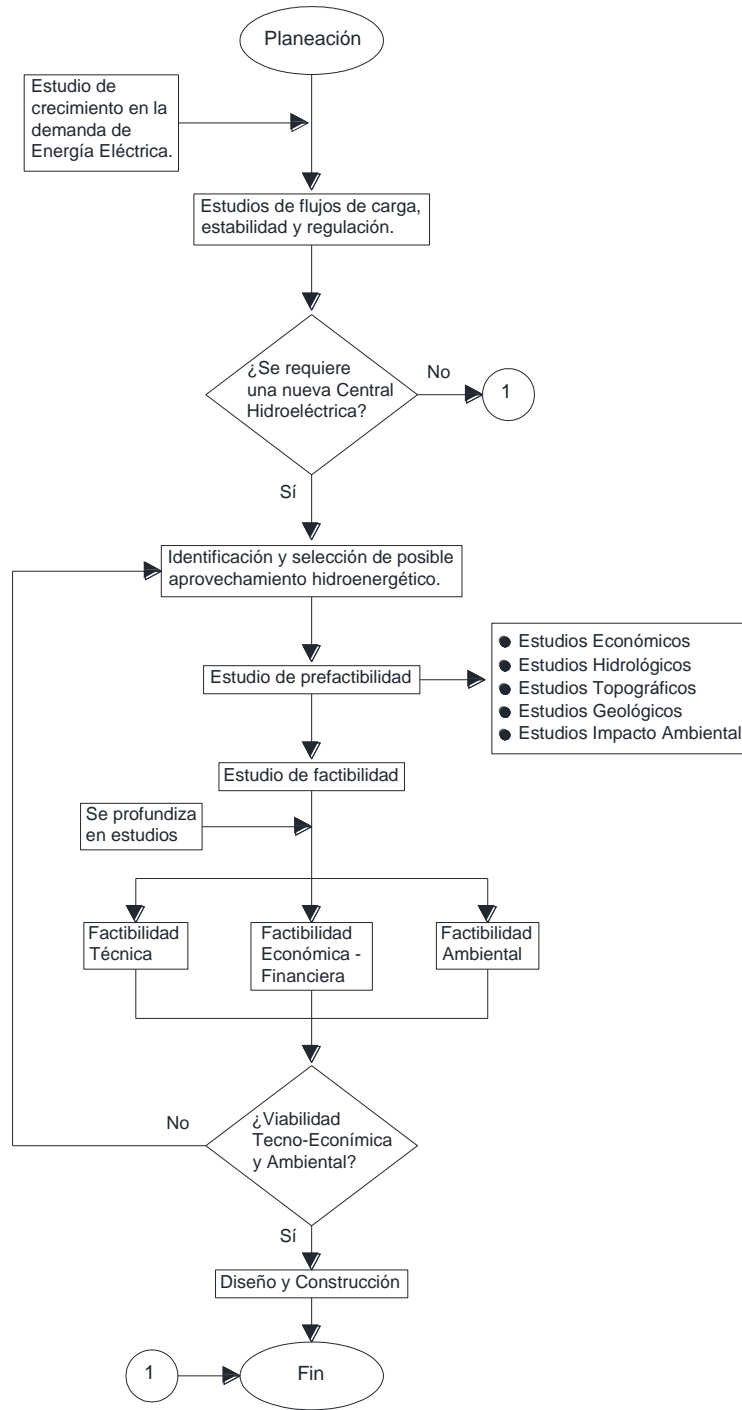


Figura 6. Principales etapas en la construcción de Centrales Hidroeléctricas (2.a)

Para llevar a cabo la construcción de una Central Hidroeléctrica, se requiere de diversos estudios y de la participación de varias áreas de ingeniería que determinen la viabilidad del proyecto, las cuales se describen a continuación.

2.2. Planeación de un Proyecto Hidroeléctrico

Una de las principales consideraciones para determinar el tipo de Central que se desea construir es identificar el principal propósito para el que será utilizada, ya sea:

- Generación
- Control de Avenidas
- Riego
- Recreación

La idea de construir una nueva Central hidroeléctrica surge con la necesidad de satisfacer la demanda de energía de la población. Para conocer la viabilidad del proyecto, es importante conocer el Factor Planta de la central, es decir, el factor de utilización que tendrá la central.

El Factor Planta también es definido como ^[5]:

$$\frac{\textit{Relación de Generación Real}}{\textit{Capacidad Instalada en la Central}}$$

Conforme a lo anterior, las plantas hidroeléctricas se clasifican de acuerdo al uso que se le dará a la Central para satisfacer la demanda de energía como:

- Planta Pico. Utilizada únicamente en horas pico del día.
- Planta Base. Utilizada para operar la mayor parte del tiempo.

Una vez definida la capacidad de generación de la Central y ya identificados sus principales propósitos de utilización, se deberán realizar varios estudios para definir si el proyecto es factible.

Los principales estudios para determinar la factibilidad de un proyecto son los siguientes:

2.2.1. Estudio económico

Antes de iniciar con los procesos de ingeniería de un proyecto hidroeléctrico, se deben evaluar los recursos económicos disponibles para su construcción, operación y mantenimiento, así como verificar el financiamiento del mismo.

En su mayoría, este tipo de proyectos no son tan atractivos económicamente debido a los tiempos tan largos de construcción y costos de obra, y por lo tanto, se tiene un periodo de retorno económico más lento.

2.2.2. Estudio Hidrológico

El objetivo de este estudio es evaluar el recurso hídrico de la región para determinar su disponibilidad para la generación de energía. Dentro de este estudio se determinan los caudales para los cuales se diseñará la presa, así como un análisis del periodo de retorno del río.

El estudio hidrológico deberá constar de lo siguiente ^[7]:

- Análisis pluviales y meteorológicos
- Observaciones de caudales
- Medición de velocidades en flujos de corriente
- Determinación de caudales
- Establecimiento en las relaciones entre niveles y caudales
- Observación de sedimentos arrastrados por las corrientes

Para analizar el manejo del río, es necesario contar con información histórica que permita conocer niveles y caudales para diferentes periodos.

En la Figura 7 se muestra el caudal medio anual del estudio de un río.

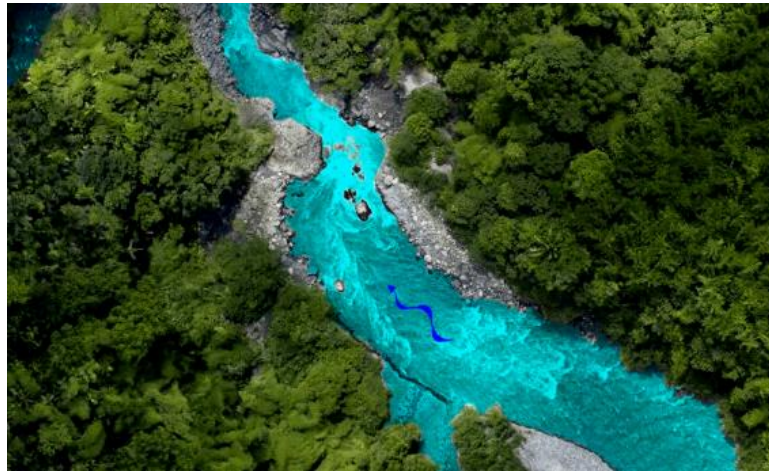
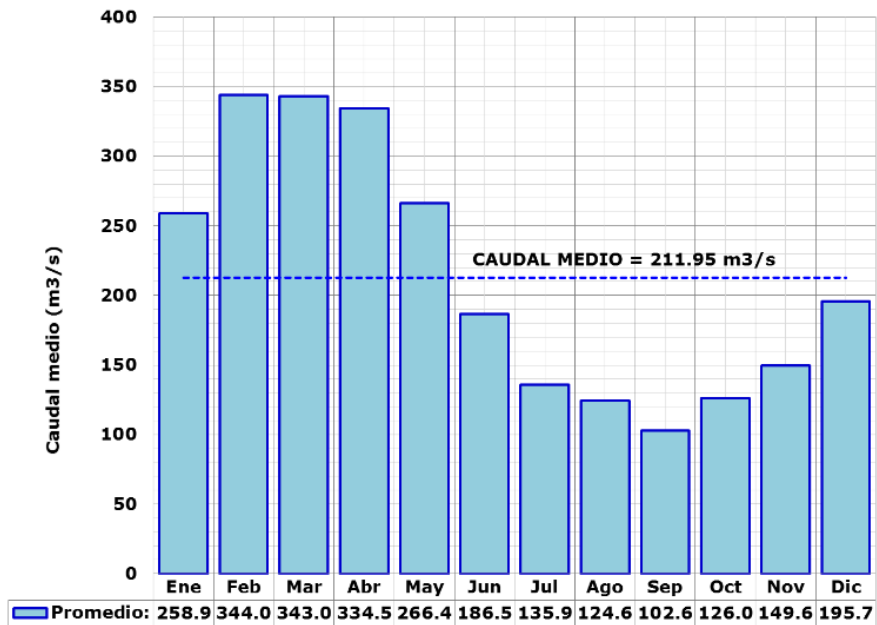


Figura 7. Caudal medio anual. (2.b)

2.2.3. Estudio Topográfico y Cartográfico

Considerando que existen áreas en donde no se cuenta con información cartográfica, se debe realizar un levantamiento topográfico en sitio para definir las diferentes características del terreno donde se localizará las Central.

Para describir y delinear detalladamente la superficie de un terreno, los estudios topográficos se realizarán por medio de diferentes elementos como:

- Imágenes satelitales
- Cartas Topográficas
- Levantamientos en sitio con GPS
- Escaneo LIDAR (Light Detection And Ranging)

Además, la realización del levantamiento topográfico es importante para continuar con el desarrollo de otras actividades como: pago de indemnizaciones y la Gestión Ambiental.

En la Figura 8 se muestra la topografía de una zona donde se planea la construcción de una Central Hidroeléctrica.

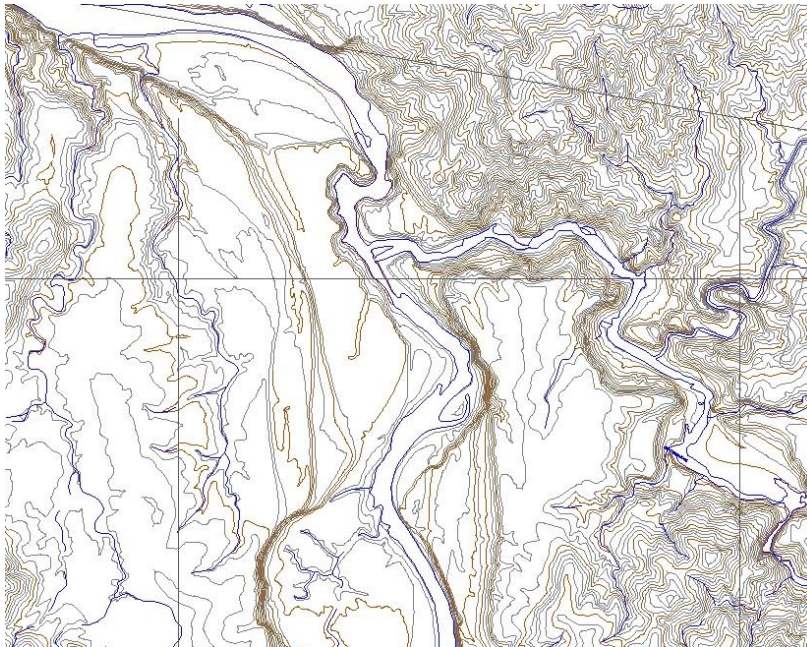


Figura 8. Topografía de la zona. (2.c)

2.2.4. Estudio Geológico y Geotécnico

Existen diferentes tipos de suelo, los cuales a su vez están conformados por varios estratos con diferentes espesores y características. A fin de evitar dificultades y riesgos potenciales durante la construcción de la Central Hidroeléctrica, se realiza un

levantamiento geológico de la superficie del sitio para garantizar que las zonas donde se planea construir la Central tengan condiciones adecuadas para las obras y presenten estabilidad en el terreno.

El estudio geotécnico proporciona información sobre la geología del terreno, es decir, determina la composición estructural de las capas del terreno, permitiendo analizar los riesgos o problemas que pudieran presentarse durante la obra.

Estos estudios también sirven de base para determinar y recomendar los parámetros para el diseño y construcción de cimentaciones, tomando en cuenta el nivel de sísmico de la zona, así como para analizar la factibilidad de utilizar el suelo existente como material de relleno y compactación.

2.2.5. Estudios ambientales

Esta actividad se refiere a la obtención de la denominada Autorización en Materia de Impacto Ambiental y a la llamada Autorización de Cambio de Uso de Suelo ante las autoridades competentes.

Para obtener la autorización se deberán tener en cuenta las leyes y reglamentos aplicables en materia ambiental para minimizar los posibles daños ambientales que se pudieran causar con la construcción. Además, el alcance de los proyectos estará determinado en función de las características propias de los terrenos donde se pretenda realizar la obra, es decir, en caso de no lograr obtener la aprobación de propietarios (ya sea por pago de indemnizaciones del predio que se pretende adquirir o que exista una oposición social por la construcción de la obra), será necesario reiniciar el proceso de selección del proyecto y buscar una nueva alternativa de ubicación.

CAPÍTULO III

CONSIDERACIONES GENERALES PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS Y MATERIALES ELÉCTRICOS

3.1. Selección de materiales y equipos

Para iniciar el proceso de diseño de una central hidroeléctrica, se deben considerar varios requisitos importantes que satisfagan las funciones por las cuales se construyó la central, además de proporcionar un beneficio económico

La Central Hidroeléctrica debe estar diseñada para soportar diferentes condiciones ambientales de la zona donde se localiza, es decir, debe proporcionar continuidad, confiabilidad y cumplir con las demandas funcionales exigidas.

El diseño de una Central Hidroeléctrica presenta una gran variedad de actividades previas, como las ya mencionadas en el Capítulo II, en las cuales se deben de tomar en cuenta varios parámetros que brinden confiabilidad y seguridad en el proyecto, como es el caso de la selección adecuada de los equipos y materiales.

La importancia de seleccionar correctamente los materiales y equipos en un proyecto hidroeléctrico, es con el propósito de obtener un beneficio económico desde la etapa de diseño, lo cual es un factor primordial y que debe ser considerado en toda construcción.

Al momento de diseñarse una Central Hidroeléctrica siempre debe de considerarse el factor económico, es decir, se deben considerar varias propuestas y arreglos que, al finalizar el proyecto, brinden confiabilidad, seguridad y al mismo tiempo presenten un beneficio económico^[1].

3.2. Interrelación entre Ingenierías

Para determinar la ubicación y dimensiones de Casa de Máquinas y de la Subestación Eléctrica, es necesaria la participación de varias áreas de ingeniería que permitan cumplir con los aspectos técnicos, económicos y funcionales del proyecto.

Es importante que exista una comunicación constante entre las diferentes áreas de ingeniería para poder dimensionar la Casa de Máquinas, y que los equipos y materiales eléctricos que se especifiquen sean los adecuados. Las decisiones deberán tomarse en conjunto entre las diferentes ingenierías para evitar contratiempos en una etapa futura.

3.2.1. Coordinación con Ingeniería Civil

En esta coordinación se determina el tipo de Casa de Máquinas que se construirá y la ubicación más conveniente de acuerdo a los estudios Geológicos, Geotécnicos, Topográficos e Hidráulicos, que fueron realizados con anterioridad.

Es la coordinación que tiene mayor impacto en un proyecto hidroeléctrico, ya que es la base para la construcción de la presa, caminos, instalaciones sanitarias, edificios, etc. Es en esta área con la que se tiene comunicación constante por parte del área eléctrica para definir la ubicación más conveniente para los equipos.

3.2.2. Coordinación con Ingeniería Hidráulica

Esta coordinación, en conjunto con el área civil y el área mecánica, determina la ubicación de la obra de toma, casa de máquinas, vertedero, tubería de presión, elevaciones en el embalse, etc. Y a pesar de no ser, aparentemente, un área que afecte al área eléctrica, las características que se lleguen a seleccionar para la Turbina afectarán directamente el Generador Eléctrico.

3.2.3. Coordinación con Ingeniería Mecánica

Esta coordinación trabaja en conjunto con el área eléctrica para determinar las posibles ubicaciones de los equipos, así como para determinar las características del Generador Eléctrico, de acuerdo a lo definido en las características de la Turbina.

Además, en esta área se definen las características y ubicación de las compuertas, válvulas, grúas, sistema de ventilación, sistemas contra incendio, sistema de vaciado, etc.

3.2.4. Coordinación con Ingeniería Eléctrica

Esta coordinación define en conjunto con el área mecánica y el área civil, la ubicación conveniente de equipos y el tipo de equipos que se requerirán de acuerdo a las características del proyecto.

En esta área se definen las características y ubicación de los materiales y equipos eléctricos que se requieren en la central, como son: generadores, transformadores de potencia, cables, sistema de alumbrado, tableros, etc.

3.3. *Equipos y Materiales Eléctricos*

La idea de tener una coordinación adecuada entre las diferentes áreas de ingeniería que participarán en el proyecto, es poder agilizar los trabajos para reducir los tiempos de entrega, minimizar errores y evitar retrasos o posibles fallas por una selección inapropiada de los equipos. Es importante que las interfaces se realicen de manera organizada, debiendo existir una planeación y una secuencia, con el fin de optimizar el costo de diseño, ya que de no aplicarse organizadamente, el tiempo de trabajo se podría alargar y eso conllevaría a gastos adicionales^[1].

La selección adecuada de los equipos y componentes a utilizar en el proyecto se deben realizar considerando la confiabilidad, continuidad y flexibilidad que brindan estos al sistema. Las áreas principales en donde se localizarán los equipos y materiales eléctricos de un proyecto hidroeléctrico serán en Casa de Máquinas y en la Subestación Eléctrica.

En la Figura 9 se muestra un esquema con la distribución típica de las áreas y suministros principales que conforman una Obra de Generación de una Central Hidroeléctrica.

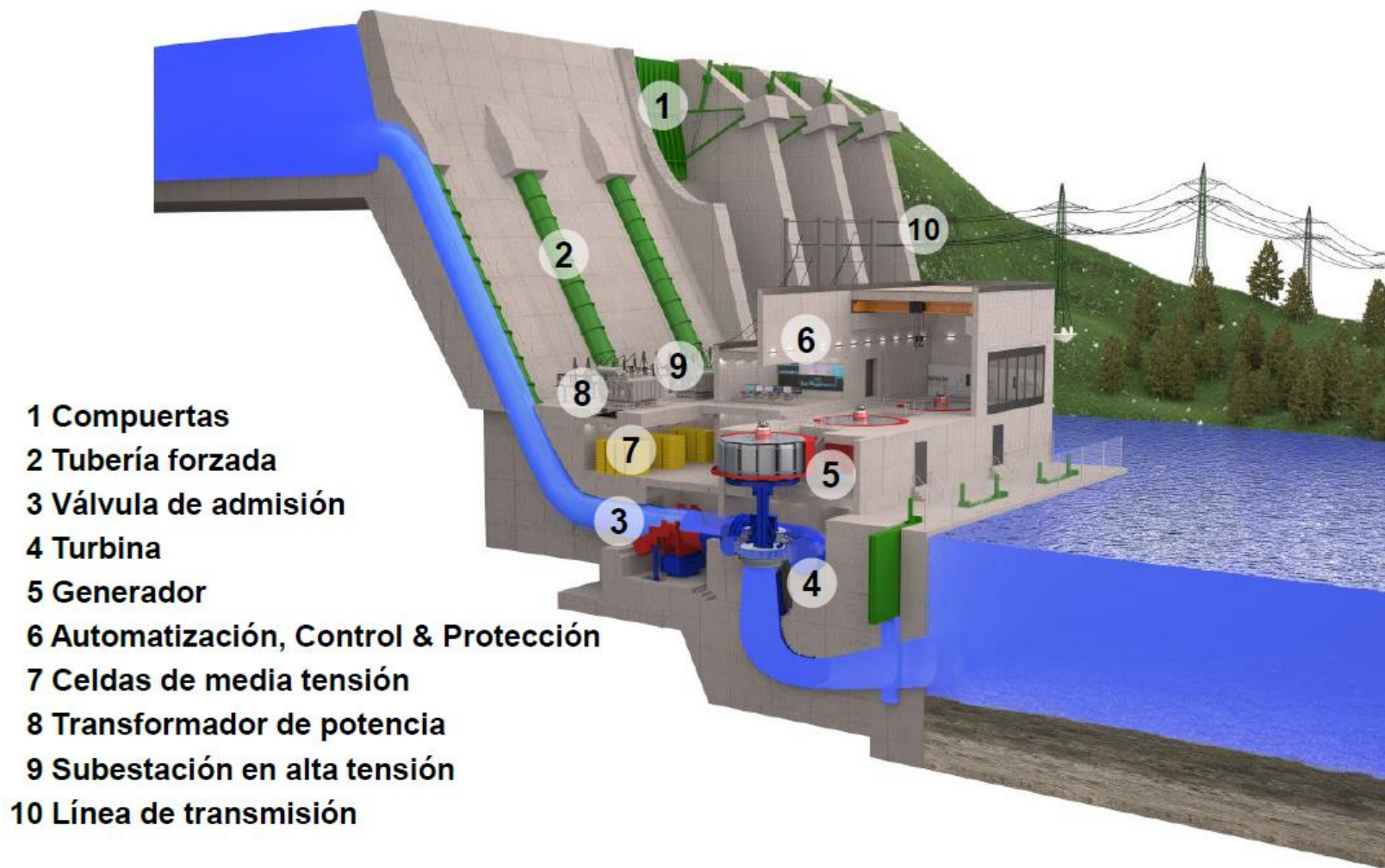


Figura 9. Distribución típica en los componentes de una Central Hidroeléctrica. (3.a)

3.3.1. Casa de Máquinas

Es un edificio en donde se localizan los equipos principales de generación, regulación y control de la Central Hidroeléctrica.

En Grandes Centrales Hidroeléctricas, la casa de máquinas se distribuye en varios niveles, en los cuales se localizan los diferentes equipos y materiales que se instalarán. En la Figura 10 se muestra la configuración típica en la que se distribuye la Casa de Máquinas de una Central Hidroeléctrica.

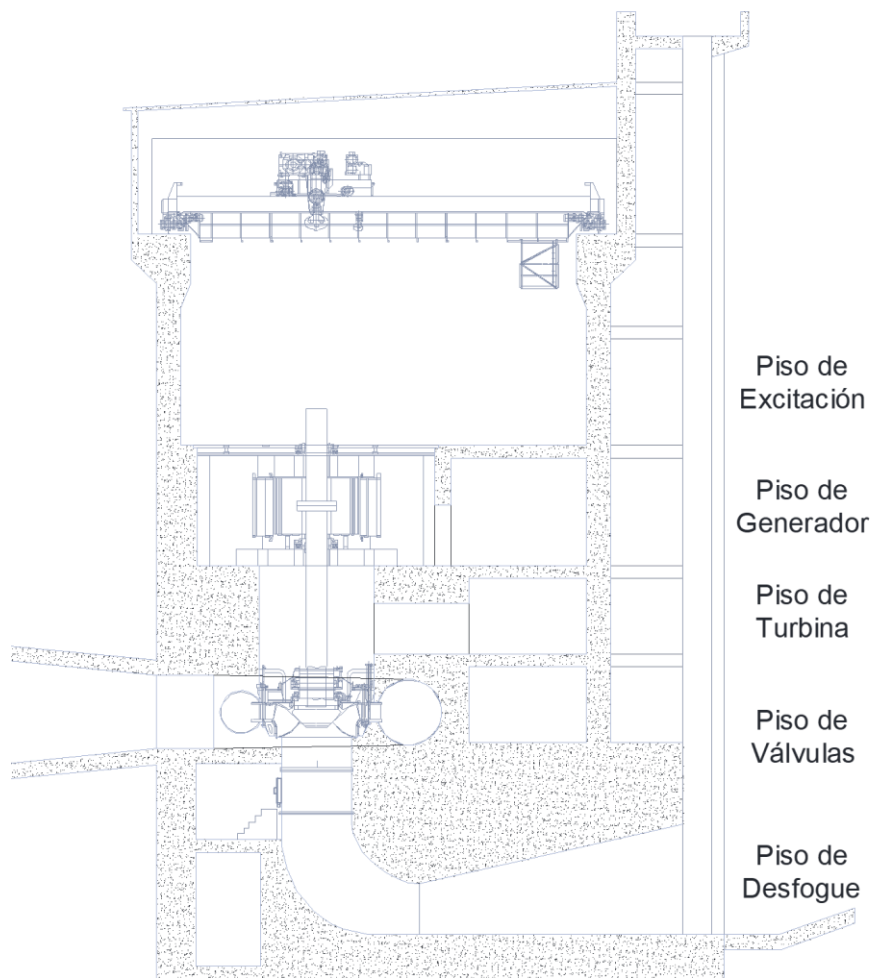


Figura 10. Niveles en los que se distribuye Casa de Máquinas. (3.b)

De acuerdo con la Figura 9, existen varios componentes hidromecánicos que conforman una Central pero no forman parte del alcance de la Tesina, por lo que únicamente se

hará referencia a las características que deben ser consideradas para la selección de materiales y equipos eléctricos.

Para definir la cantidad de Equipos y Materiales eléctricos, se debe elaborar un listado de los equipos a instalar para toda la central, y en base a la lista, definir el número de equipos eléctricos para casa de máquinas, estimación de dimensiones, requerimientos de espacio y accesos para operación y mantenimiento de cada uno de los equipos [5].

3.3.1.1. Generador Eléctrico

El Generador, junto con la Turbina, es de los equipos más importantes que conforman una Central Hidroeléctrica y son la base para dimensionar la Casa de Máquinas.

Es importante que se realice una correcta selección de la Turbina, ya que sus características serán el punto de referencia para poder determinar el tipo de generador que se requerirá para el proyecto, así como para definir el tamaño de la Casa de Máquinas que se requiere.

Una selección cuidadosa del Generador Eléctrico, proporcionará un beneficio económico en la generación de energía y un ahorro para la Obra Civil en la etapa de construcción. Para su selección se deben considerar varios aspectos:

- Construcción

Por su tipo de construcción, los generadores se clasifican en síncronos y asíncronos:

Generador síncrono: Son máquinas en las cuales el generador girara a la velocidad del campo magnético, por lo que a esta igualdad de frecuencias se le denomina sincronismo.

Generador asíncrono: En este tipo de generadores existe un desfaseamiento entre los campos del estator y el rotor, teniendo una velocidad asincrónica.

A pesar de que los generadores asíncronos son más baratos, para proyectos hidroeléctricos de Grandes Centrales Hidroeléctricas es común el uso de Generadores

síncronos. Esta preferencia se debe a que este tipo de generadores permiten tener un control exacto de la tensión eléctrica y/o de la energía producida.

El Grado de protección del Generador, ante agentes externos, deberá satisfacer las condiciones ambientales y climáticas del sitio en donde se localizará y a las que estará expuesto.

- **Rotor**

La cantidad de polos del Generador será definida con respecto a la velocidad de diseño de la turbina. Los polos del Generador utilizados en proyectos hidroeléctricos son del tipo “Polos Salientes”, esto es debido a que sus velocidades de giro no son tan grandes como las alcanzadas en proyectos Termoeléctricos, en los que se requiere el uso de Polos Lisos.

El tipo de eje de los Generadores en grandes centrales hidroeléctricas, al requerir de diseños y equipos de dimensiones más grandes por las potencias de generación, en su mayoría son del tipo Vertical, ya que el Generador deberá interconectarse a la Turbina por medio de un eje Vertical.

En la Figura 11 se muestra el Eje Vertical del Generador interconectado con la turbina.

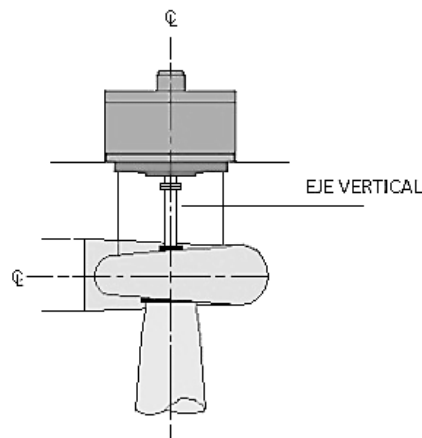


Figura 11. Generador de eje vertical. (3.c)

- Estator

El estator está constituido por una carcasa que contiene ranuras en las cuales se encuentran conductores conectados entre sí, de tal forma de crear un conjunto de bobinas por las que circulará una corriente eléctrica. Cuando el rotor gira, el flujo del campo magnético a través del estator varía con el tiempo, por lo que se generará una corriente eléctrica.

El fabricante del Generador deberá diseñar el equipo de acuerdo a las características del rotor: núcleo magnético, bobinado, etc.

- Refrigeración

La refrigeración de los generadores puede ser de varios tipos, siendo el enfriamiento por medio de agua el más utilizado en grandes centrales:

Auto-enfriado: El generador absorbe aire del exterior y lo hace circular en su interior para su enfriamiento.

Ventilación forzada: Se utilizan ventiladores externos para la ventilación del generador.

Agua de enfriamiento: Se hace circular agua en el interior del generador para su enfriamiento.

- Sistema de Excitación

En grandes Centrales Hidroeléctricas es importante que se considere el tipo de sistema excitación que será utilizado para el Generador, ya que este puede impactar en el costo final del proyecto y en las dimensiones de la casa de Máquinas. Los sistemas de excitación más utilizados en este tipo de proyectos son el tipo Estático y el tipo Brushless.

El sistema de excitación Estático es el más utilizado en proyectos de Grandes Centrales Hidroeléctricas, se realiza por medio de un transformador y equipos rectificadores. Se tiene la ventaja de tener menores dimensiones en el Generador, pero se tiene la desventaja de tener un aumento en la cantidad de equipos para la excitación del equipo.

El sistema de excitación tipo Brushles es un sistema que se ha ido utilizando en los últimos años en pequeñas Centrales Hidroeléctricas, ya que forma parte del mismo Generador, lo cual reduce la cantidad de equipo necesario para la excitación. Su principal desventaja es el aumento en el peso del Generador, teniendo un impacto en la obra civil y un aumento en el costo del proyecto.

3.3.1.2. Bus del Generador

Para llevar a cabo la interconexión entre el Generador y el Transformador de Potencia, es necesario verificar cuál es la opción más conveniente para interconectarlos, ya sea por medio de buses o cables de potencia. La opción más conveniente se determinará de acuerdo a la cantidad de corriente eléctrica que circulará en las terminales de salida del Generador.

En Generadores de Grandes Potencias es común el uso de Buses, ya que de no ser así se requeriría de varios cables de potencia por fase y de calibres muy grandes, lo cual se hace poco viable en el aspecto de diseño.

Los tipos de buses que se utilizan para proyectos hidroeléctricos son los siguientes:

Bus de Fase Aislada

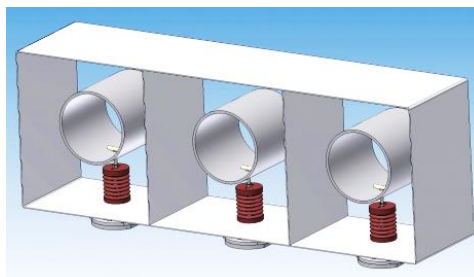
Las fases se encuentran en ductos de manera independiente.



(3.d)

Bus de Fase Segregada

Las fases se encuentran dentro de un mismo ducto pero separadas por barreras de metal entre las fases.



(3.e)

Antes de seleccionar el tipo de buses que se utilizarán en un proyecto, se deben considerar varios factores como: niveles de corriente admisibles, espacio que requieren, facilidad para su montaje y acceso para su mantenimiento, comportamiento sísmico, etc.

Cada una de estas consideraciones puede implicar modificaciones en el diseño y un incremento en el costo, es por eso que se debe seleccionar cuidadosamente el tipo de material que se utilizará para la interconexión.

3.3.1.3. Transformador de Potencia

Los transformadores de potencia pueden ser de diferentes tipos y características, de acuerdo con su diseño y tipo de construcción, y se pueden clasificar en:

Transformador trifásico

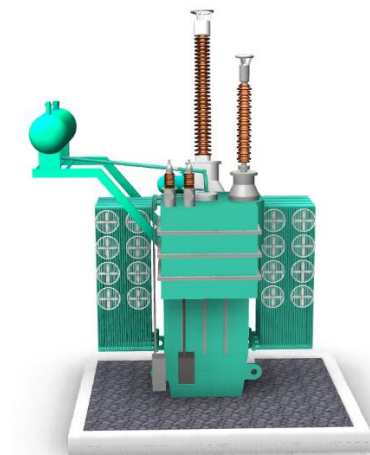
Son transformadores que en una misma unidad tienen instalados tres devanados para las tres fases del sistema. Es suficiente contar con una sola unidad para satisfacer los requerimientos del sistema eléctrico ^[1].



(3.f)

Transformador monofásico

Estos transformadores son utilizados para manejar una sola fase. Se requieren de tres unidades monofásicas para conformar un “banco de transformación”.



(3.g)

- Selección de Transformadores

La selección de usar un transformador trifásico o bien un banco de transformación, dependerá de determinados parámetros y necesidades del proyecto, incluyendo los siguientes [1]:

Capacidad. La capacidad de un transformador de potencia en un proyecto hidroeléctrico, dependerá de la capacidad de energía generada en cada central. Para la selección del transformador, deberán considerarse equipos con capacidades y diseños comerciales del país en el que se encuentre la central, es decir, utilizar equipos en los que en caso de existir una falla se pueda tener una sustitución casi inmediata, evitando diseños específicos que incrementen el costo del equipo.

Se debe cuidar la compatibilidad entre las unidades que se seleccionen, destacando entre éstas la impedancia, para evitar corrientes circulantes y sobrecalentamiento.

- **Nivel de tensión.** La elección de los equipos de transformación dependerá del nivel de tensión en el que se utilizarán. Generalmente, los transformadores utilizados para enlazar sistemas de alta tensión con media tensión son trifásicos, mientras que los transformadores utilizados para enlazar sistemas de extra alta tensión con media tensión son monofásicos. Por otro lado, el nivel de tensión es proporcional a la potencia generada.
- **Confiabilidad.** Se debe seleccionar el transformador a utilizar dependiendo de la importancia y continuidad que se pretenda dar al sistema. Por esta razón es importante que la capacidad del generador se seleccione de acuerdo a las capacidades comerciales de transformadores, así, en caso de suceder alguna falla, se puede sustituir el transformador con cualquier fabricante.
- **Transporte.** Otro aspecto a considerar será la forma de transporte y las vías de comunicación por donde se trasladará el equipo de transformación. Si el equipo de

transformación es trifásico y de una capacidad extraordinaria, podría presentarse algún tipo de problema durante su transporte, por el peso y dimensiones tan grandes. Se debe tener en cuenta que en algunas ocasiones no existen caminos existentes a los proyectos donde se planea diseñar los proyectos hidroeléctricos, por lo que se hace más costoso y más complicado el transportar equipos con dimensiones muy grandes, al tener que construir la infraestructura con las dimensiones y características para el transporte que se requiera.

- **Tipo de enfriamiento.** Es importante tener en cuenta que el transformador es uno de los equipos principales que conforman un proyecto hidroeléctrico, por lo tanto, se debe tener cuidado en que su operación se realice sin ningún problema y evitar un sobrecalentamiento. Para definir la clase de enfriamiento se debe considerar la capacidad del transformador, ya que dependiendo del sistema de enfriamiento que se utilice los requerimientos de espacio para el transformador variarán, así como también se deberá seleccionar adecuadamente el tipo de enfriamiento para evitar problemas futuros por fallas y costos por mantenimientos continuos. La selección del sistema de enfriamiento también deberá considerarse de acuerdo a las características del medio ambiente en el sitio de su instalación.
- **Costo.** El costo es un factor determinante para la elección de un transformador. En general, el costo por MVA disminuye conforme la capacidad del equipo aumenta, es decir, es más costoso utilizar unidades de capacidades menores, a utilizar unidades con capacidades grandes, por lo tanto, sería más económico utilizar un transformador trifásico en lugar de utilizar un banco de transformación, pero esto nos lleva a un problema de transporte ya que las dimensiones serían extraordinarias y el nivel de confiabilidad se perdería al no tener otra unidad de reserva en caso de falla.
- **Dimensiones.** Otro de los aspectos a considerar para determinar el tipo de transformadores que se utilizará, es la cantidad de espacio disponible para ubicar los transformadores lo más cercano a Casa de Máquinas, ya que en algunas

ocasiones se requiere de transformadores con dimensiones extraordinarias y su ubicación se complica por la falta de espacio.

- **Peso.** Elegir entre un transformador trifásico o bancos de transformadores puede llegar a afectar en la parte de la cimentación del lugar donde se ubicará, esto puede elevar el costo de la obra civil y del proyecto.

La ubicación de los transformadores en un proyecto hidroeléctrico, se debe definir en coordinación con el área de ingeniería civil, tomando en consideración el tipo de casa de máquinas, la topografía del sitio, dimensiones y masa de los transformadores, requerimientos de espacio para acceso y mantenimiento, salida de líneas de transmisión y conexión con la subestación del proyecto^[4].

3.3.1.4. Servicios Auxiliares

Los Servicios Auxiliares de una Central Hidroeléctrica son el conjunto de equipos e instalaciones que permiten suministrar la energía eléctrica (en corriente alterna y en corriente directa) que se requieren en la Presa, en Casa de Máquinas y en la Subestación Eléctrica.

Los Servicios Auxiliares se conforman por diferentes equipos y materiales que satisfacen las necesidades de un proyecto. Los principales equipos que se utilizan son:

- **Transformador de Servicios Auxiliares.**

Para el sistema de servicios auxiliares en corriente alterna se debe considerar que existirán dos fuentes de alimentación, una será el propio grupo turbogenerador a través del transformador de servicios auxiliares conectado en la derivación de la salida del generador, y la otra fuente es un grupo electrógeno diesel. Cabe mencionar que cuando ambas fuentes se encuentren fuera de servicio, la energía para los servicios auxiliares se puede tomar de la red del sistema interconectado (en caso de existir una línea existente cercana para un respaldo de energía).

Es importante que la selección de este transformador se realice conforme la carga estimada que será instalada.

- **Planta Diesel**

La planta diesel, al igual que el transformador de servicios auxiliares, deberá seleccionarse con la capacidad suficiente para suministrar la energía requerida por los servicios propios esenciales (tableros de control de unidad, tablero de sistema de enfriamiento, tableros de sistema contra incendio, etc.) de la instalación eléctrica durante condiciones de emergencia o de ausencia del suministro normal de energía.

El grupo electrógeno diesel debe contar con un tanque de reserva para una semana de operación continua. La planta debe ubicarse junto con su tanque, lo más cerca posible de algún lugar donde se tenga acceso fácil para poder recargar el tanque sin ningún problema, además, debe localizarse preferentemente cerca del área de los tableros de servicios auxiliares donde se interconectará.

Banco de baterías y Cargador de Baterías

El banco de baterías será utilizado para energizar los equipos de corriente directa. Las baterías que podrán seleccionarse pueden ser de dos tipos: baterías de Plomo-Ácido o baterías de tecnología Níquel-Cadmio.

El tipo de baterías que se seleccionen para un proyecto pueden incrementar el costo del equipo, como es el caso de las baterías Níquel-Cadmio, las cuales son más costosas, pero requieren de un mantenimiento más bajo y cuentan con una vida útil más larga.

Para la selección de los cargadores, deberá haber un suministro de un cargador por cada banco de baterías para su alimentación al sistema de corriente directa.

Una de las características que tienen un impacto económico en el costo de los equipos, y que se debe considerar durante su selección, es la capacidad de los cargadores, así como la previsión de un cargador de baterías de reserva.

3.3.1.5. Sistema de Alumbrado

Los sistemas de alumbrado de un proyecto hidroeléctrico son diseñados para proporcionar la iluminación suficiente en diferentes zonas e instalaciones, para llevar a cabo satisfactoriamente todas las funciones y operaciones necesarias.

El sistema de alumbrado se divide principalmente en tres tipos de sistemas: sistema de iluminación normal, sistema de iluminación esencial y sistema de iluminación de emergencia; así como también se divide en iluminación interior e iluminación exterior, dependiendo del área que se quiera iluminar.

Para la selección del tipo de equipos de iluminación deberán considerarse varias características: tiempo de vida, grado de protección, cantidad de iluminación que se requiere para cada área y tipo de luminarias que se van a utilizar (LED, incandescentes, fluorescentes, vapor de sodio, etc.).

3.3.1.6. Sistema de Tierras

La importancia de contar con un Sistema de Tierras, es brindar una trayectoria de baja impedancia por la cual circulen las sobrecorrientes generadas por fallas eléctricas y por descargas atmosféricas ^[1].

Es importante contar con un buen sistema de Tierras, ya que limita las tensiones, brindando protección y seguridad a los equipos, instalaciones y al personal que se encuentra en la Central.

Un diseño adecuado de un sistema de tierras proporcionará un beneficio económico al seleccionar adecuadamente la cantidad de varillas enterradas y seleccionar adecuadamente el conductor de la malla, además de dar seguridad y confiabilidad en la operación de la Central Hidroeléctrica.

3.3.1.7. Sistema de Protección, Control y Medición

El sistema de protección, control y medición, permite evaluar las condiciones de operación y realizar las acciones necesarias para mejorar la calidad y continuidad del servicio de suministro de energía eléctrica de la central hidroeléctrica.

Para tener un control de la central, se requiere de un sistema SCADA (Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos). Este sistema proporciona información en tiempo real para monitorear, controlar, y supervisar, desde un cuarto de control, las diferentes áreas y elementos que conforman las Centrales Hidroeléctricas.

Dependiendo de qué tan redundante se requiera que sea el sistema, el costo de proyecto se incrementará.

El sistema SCADA se debe seleccionar con base en los equipos probados en condiciones reales de operación, lo que incrementará su confiabilidad.

Dependiendo de la capacidad del grupo Generador-Transformador, se debe determinar la redundancia en las funciones de protección, ampliando las funciones de protección que ayuden a detectar diversos tipos de fallas con base en la probabilidad de ocurrencia, su impacto en la vida útil del equipo y su costo relativo.

3.3.2. Subestación Eléctrica

Una subestación eléctrica es aquella en la cual se puede transformar la energía eléctrica a niveles adecuados de tensión para su transmisión, distribución y consumo bajo determinados requerimientos de calidad, confiabilidad y eficiencia ^[10].

Es importante que para obtener un beneficio económico en la construcción de la subestación se seleccione adecuadamente de acuerdo a lo siguiente:

- Por su función
- Por su nivel de tensión
- Por su tipo de aislamiento

- Por su forma de instalación

3.3.2.1. Por su función

En Grandes Centrales Hidroeléctricas, el tipo de subestaciones que se utilizarán serán subestaciones elevadoras, las cuales tienen la función principal de elevar las tensiones de salida de las unidades generadoras, de un nivel de media tensión, a un nivel de alta o extra alta tensión.

3.3.2.2. Por su nivel de tensión

Las subestaciones se clasifican en dos tipos:

- Subestación de distribución: Aquellas cuyas tensiones secundarias son en media tensión.
- Subestación de transmisión: Aquellas cuyas tensiones secundarias son en alta o extra alta tensión.

De acuerdo a lo indicado por la IEC (International Electrotechnical Commission) ^[8], los niveles de tensión en los sistemas eléctricos de potencia se clasifican de la siguiente manera internacionalmente:

Tabla 3. Clasificación de los niveles de Tensión a nivel Internacional

Nivel de Tensión	[V]
Baja Tensión	100 – 1 000
Media Tensión	1 001 – 35 000
Alta Tensión	35 001 – 245 000
Extra Alta Tensión	≥ 245 000

De acuerdo con el reglamento de la ley de la industria eléctrica ^[9], los niveles de tensión aplicables en México, son los siguientes:

Tabla 4. Clasificación de los niveles de Tensión en México

Nivel de Tensión	[V]
Baja Tensión	$\leq 1\ 000$
Media Tensión	1 001 – 35 000
Alta Tensión	$\geq 35\ 000$

3.3.2.3. Por su tipo de asilamiento

Subestación Convencional. Son subestaciones en donde el aislamiento de sus equipos está dado por el aire del medio ambiente en el que se encuentran.



Su principal desventaja radica en el espacio requerido para ubicar todos los componentes de potencia. (3.h)

Subestación Encapsulada en SF₆. Los equipos que conforman este tipo de subestaciones se encuentran dentro de módulos herméticamente cerrados, que contienen gas SF₆ (hexafluoruro de azufre) a presión. Este tipo de subestaciones permiten su instalación en lugares con espacios muy reducidos. Su principal desventaja es el incremento en el costo del equipo. (3.i)



3.3.2.4. Impacto económico de la subestación en un proyecto Hidroeléctrico.

La subestación eléctrica es una de las áreas con gran impacto económico dentro de un proyecto hidroeléctrico, ya que se deben elegir cuidadosamente cada uno de los aspectos mencionados en los puntos anteriores para poder obtener un beneficio económico.

Tanto en subestaciones aisladas en aire como en subestaciones aisladas en gas SF₆, se deben considerar varios factores para su selección, como es el caso de costo de equipos, costo de terreno, obras, montajes, entre otras características.

- Subestaciones Aisladas en Aire

Las subestaciones aisladas en aire son las más comunes y las más utilizadas en gran parte del mundo por ser más económicas que las subestaciones encapsuladas en SF₆, pero se tiene la desventaja de ocupar mayor espacio, lo cual incrementa el costo en obra civil y se eleva el costo por la compra de terrenos.

Si se dispone de terrenos amplios de bajo costo, como es el caso de terrenos que se encuentran alejados de ciudades, entonces las subestaciones aisladas en aire resultan ser más económicas que las subestaciones aisladas en gas SF₆. Es importante destacar que a pesar de que los terrenos se encuentren alejados, no siempre es una opción utilizar una subestación convencional, ya que se debe considerar también la topografía del terreno, si se trata de áreas naturales protegidas, factibilidad para adquisición del predio, zonas de riesgo, etc.

Otro de los aspectos que intervienen en el costo de la subestación es el tipo de arreglo de barras que tendrá la subestación, pudiendo ser desde un 'arreglo de 'barra simple', hasta una configuración de 'doble barra y doble interruptor'. La elección del arreglo de barras de una subestación se selecciona tomando en cuenta las características del sistema eléctrico y la función que realizará dicha subestación en el sistema.

- **Subestaciones Encapsuladas en SF₆**

Con el paso del tiempo y el avance de la tecnología, los costos de las subestaciones aisladas en gas SF₆ han ido disminuyendo y su uso ha ido incrementando. Actualmente sigue siendo más costoso el uso de esta tecnología, aunque existen casos particulares en donde resulta más económico el uso de una subestación aislada en gas SF₆.

Un ejemplo reciente es el caso de Chicoasen II, en donde se tenía contemplado el uso de una subestación convencional, la cual requería de un área extensa y los problemas sociales impedían obtener los permisos. Si bien, las subestaciones encapsuladas son muy costosas, existen algunos proveedores con precios bastante competitivos que tal vez no igualan el precio de una subestación convencional, pero éstos son muy cercanos al valor total.

Con esto se obtiene un beneficio en tiempo, en obra civil y se evitan problemas futuros para la adquisición de terrenos.

La principal ventaja que presenta este tipo de subestaciones, es que permiten reducir aproximadamente a un 10% el espacio requerido por las subestaciones aisladas en aire ^[10].

Además de obtener el beneficio de un ahorro de espacio, las subestaciones encapsuladas también presentan las siguientes ventajas:

- Requerimiento de espacio mínimo, y por consiguiente, menores costos de adquisición
- Menor tiempo de implementación
- Mayor facilidad de transportación de sus componentes
- Reducción de mantenimientos
- Afectación nula por contaminación y climas extremos
- Menor impacto visual

Aunque el costo de una subestación encapsulada es más alto que una subestación convencional, los costos de operación y mantenimiento de este tipo de subestaciones son menores al requerir de menor mantenimiento, y esto las hace una opción viable en el aspecto económico y técnico, ya que se asegura una mayor continuidad y confiabilidad en el sistema.

Las subestaciones aisladas en gas, a pesar de no ser las más comunes ni las más utilizadas, suelen utilizarse también cuando el costo de los terrenos es muy elevado. En estos casos las subestaciones aisladas en gas SF₆ resultan ser más económicas que las subestaciones aisladas en aire.

3.3.3. Línea de Transmisión

La línea de transmisión es una instalación eléctrica constituida por estructuras, cables conductores, aisladores y herrajes, que instalados en conjunto permiten la transmisión de energía eléctrica.

La línea de transmisión es uno de los elementos del sistema eléctrico que deben estudiarse cuidadosamente para evitar costos extras y retrasos durante el proceso construcción de un proyecto hidroeléctrico.

En gran parte de los proyectos hidroeléctricos la línea de transmisión no siempre forma parte de los proyectos, ya que las instituciones encargadas del sistema eléctrico de cada país, son las encargadas de su diseño y construcción.

Aunque no siempre las líneas de transmisión forman parte de un proyecto hidroeléctrico, a continuación se mencionan las características principales que se deberán considerar para determinar cuál es la opción más favorable para el diseño de la línea de transmisión. Parte de los aspectos que deben seleccionarse son:

- Nivel de tensión
- Cantidad de circuitos

- Cantidad de salidas o llegadas de líneas.
- Calibre de conductores
- Cantidad de conductores por fase
- Longitud de la línea
- Tipo de estructuras

Además de lo anterior, para seleccionar de manera adecuada la trayectoria de una línea de transmisión se deben considerar varios aspectos técnicos, entre los principales se incluyen:

- Cantidad y tipos de estructuras (suspensión, deflexión o remate)
- Derecho de vía
- Cantidad de puntos de inflexión
- Cruzamientos
- Aspectos ambientales y ecológicos
- Aspectos Sociales
- Topografía del terreno

CAPÍTULO IV

BENEFICIOS DE UNA SELECCIÓN ADECUADA DE MATERIALES Y EQUIPOS EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

4.1. Aspecto Económico

Muchas veces el criterio de selección de materiales y equipos se realiza de manera extraordinaria, lo cual genera un gasto mayor en los proyectos, reduciendo las ganancias y la factibilidad de éstos. Es por eso que se debe tener mucha atención y cuidado al momento de realizar la selección junto con las diferentes áreas de ingeniería que intervienen en cada proyecto, evitando costos extraordinarios y pérdidas por una mala selección o diseño.

Los costos de un proyecto son el valor económico utilizado para la adquisición de bienes o servicios ^[1]. Las Centrales Hidroeléctricas deben construirse con un diseño específico, de acuerdo a las características de cada lugar, debiendo satisfacer los requerimientos del cliente.

El aspecto principal que se considera siempre que se lleva a cabo la realización de un proyecto hidroeléctrico, y en todo proyecto, es el aspecto económico. Por esta razón es importante que la selección de los materiales y equipos que se utilizarán en los proyectos se seleccionen considerando un beneficio económico, pero siempre manteniendo la confiabilidad y seguridad en la instalación. La reducción de costos en la construcción de Centrales Hidroeléctricas es un factor clave para poder llevar a cabo su realización.

4.2. *Diferentes aspectos para economizar el proyecto*

Es importante tener en cuenta que el buen diseño de una Central Hidroeléctrica tiene un gran impacto en su costo final, reduciendo los costos de equipos, los costos de construcción y mantenimiento.

Para saber si un proyecto es factible económicamente se deben realizar varios estudios y propuestas con diferentes alternativas en las que se incluyan diversas variantes de equipos y arreglos generales del proyecto. En cada variante se debe realizar un estudio completo para poder descartar las diferentes alternativas y definir la opción más conveniente.

Con la finalidad de proporcionar una solución de menor costo que satisfaga los requerimientos de un proyecto, el diseño debe realizarse de acuerdo a las características específicas de cada sitio en el que se construirá la Central; por esta razón es importante que se realicen estudios detallados que eviten contratiempos que retrasen el proyecto, y se evite la compra de materiales y equipos extraordinarios que no sean requeridos.

Durante la selección de Materiales y Equipos de una Central Hidroeléctrica, existe un tema muy importante que es cumplir con un determinado porcentaje de integración nacional para el desarrollo del proyecto, es decir, no se deberá sobrepasar del porcentaje estimado para equipos y materiales importados del extranjero. Este tema es muy importante, ya que los equipos y materiales que se seleccionen, deberán ser fabricados en su mayoría en el país en el que se desarrolle el proyecto.

4.3. *Reducción de costos en la selección de equipos y materiales eléctricos en Grandes Centrales Hidroeléctricas*

Hoy en día muchos de los diseños realizados para proyectos hidroeléctricos se encuentran sobredimensionados e incluyen características extraordinarias que, en algunos casos, no son necesarios e influyen en el costo final del proyecto.

Un ejemplo muy común que se presenta en Grandes Centrales es tener un Generador o Turbina sobredimensionados, ya sea por un mal cálculo en el pre-dimensionamiento de la turbina, del generador o por un error en los estudios hidráulicos. Esto implica en que la casa de máquinas sea de mayores dimensiones y que los costos de construcción aumenten, además de existir un aumento en el costo de los equipos.

Como se mencionó en el Capítulo 2, existen varias áreas de ingeniería que participan en conjunto para la realización de un proyecto hidroeléctrico. En algunos casos, una equivocación en los estudios o una mala coordinación entre las diferentes áreas de ingeniería, tienen un impacto en el costo final de un proyecto.

A continuación se incluye un ejemplo real en el cual se muestra la afectación tecno-económica que hay al existir una equivocación al momento de planear un proyecto hidroeléctrico. El proyecto tuvo un estudio inicial para una instalación de 700 MW, pero después de realizar estudios más detallados, se obtuvo que se podía tener un aprovechamiento mayor, y finalmente tener una potencia instalada de 750 MW.

En el Ejemplo 1, se muestra la variación de características en el diseño de una central para un proyecto de 700 MW y un proyecto de 750 MW.

Ejemplo 1: Proyecto Hidroeléctrico

Pre-dimensionamiento del Generador para un Proyecto Hidroeléctrico con potencia instalada de 750 MW

Tomando en cuenta que en una etapa inicial de diseño no se cuenta con las características específicas de los equipos por parte del fabricante, se considera un método para la realización del diseño preliminar de los equipos principales electromecánicos. Existen varios métodos para la realización del pre-dimensionamiento del Generador, para este ejemplo utilizaremos el procedimiento desarrollado por Comisión Federal de Electricidad (CFE) del “Manual de Recomendaciones para la Selección y Pre-especificación del grupo Turbina-Generador”.

TURBINA

Considerando que por parte de los estudios Hidráulicos y Mecánicos se obtiene que en el proyecto se utilizará una Turbina tipo Francis de Eje Vertical, y de acuerdo a sus caudales (Q) y alturas (H) se obtiene la potencia de la turbina.

Para calcular la potencia de diseño de la turbina se sugiere un valor de la eficiencia para la turbina de 0,945.

$$P_D = 9,791 * Q_D * H_{ND} * \eta \quad (1)$$

Donde:

P_D = Potencia de diseño de la turbina (kW).

Q_D = Caudal de diseño (m³/s). (249.22, obtenido por estudios hidráulicos)

H_{ND} = Altura neta de diseño (m). (163.35, obtenido por estudios hidráulicos)

η = Eficiencia

Sustituyendo los valores se tiene:

$$P_D = 9,791 * 249.22 * 163.35 * 0,945$$

$$P_D = \underline{376670 \text{ [kW]}}$$

GENERADOR

Datos de entrada obtenidos de la turbina

P_{DIST} - Potencia de diseño de la turbina = 376670 kW,

N - Velocidad nominal = 150 rpm,

p - Número de polos = 48 polos,

Para calcular la potencia aparente nominal del generador obtenemos que:

$$P_{NOMG} = P_D * \eta_G \quad (2)$$

Donde:

P_{NOMG} = Potencia nominal del generador (kW)

P_D = Potencia diseño de la turbina (kW)

La eficiencia del generador es 0,975 y el factor de potencia es de 0,85, por lo que, la potencia nominal del generador en kilowatt es:

$$P_{NOMG} = 376670 \cdot 0.975$$

$$P_{NOMG} = \underline{367253 \text{ [kW]}}$$

Por lo tanto, si consideramos un factor de potencia desfavorable para tener un rango mayor en el diseño del generador, tenemos que la potencia aparente del generador es:

$$P_{AG} = P_{NOMG} / F.P. \quad (3)$$

$$P_{AG} = 367253/0,85 = \underline{432062 \text{ kVA}}$$

Para efectos prácticos se toma 432 [MVA]

Pre-dimensionamiento del Generador

El diámetro exterior del rotor del generador se calcula con:

$$D_{ER} = [730 (F_1 F_3) / (F_4 N)]^{1/2} \quad (4)$$

Donde:

D_{ER} - Diámetro exterior del rotor [m],

F_1, F_3, F_4 - Constantes,

N - Velocidad síncrona [rpm].

Las constantes F_1, F_3, F_4 se calculan por medio de:

$$F_1 = 0,9 (P_{AG})^{1/4} [1 - (N/2000)] \quad (5)$$

Donde:

P_{AG} - Potencia aparente nominal del generador [MVA]

La constante F_3 se calcula con:

$$F_3 = 5 (P_{AG}/p)^{1/4} \quad (6)$$

Donde:

p - Número de polos del rotor,

P_{AG} - Potencia aparente nominal del generador [MVA].

La constante F_4 se calcula con:

$$F_4 = 3,5 - [1,15 \log (p)] \quad (7)$$

Donde:

p - Número de polos del rotor.

De acuerdo a lo anterior, el valor de la constante F_1 es:

$$F_1 = 0,9 (432)^{1/4} [1 - (150 / 2000)]$$

$$F_1 = 3,795$$

El valor de la constante F_3 es:

$$F_3 = 5 (432 / 48)^{1/4}$$

$$F_3 = 8,66$$

El valor de la constante F_4 es:

$$F_4 = 3,5 - [1,15 \log (48)]$$

$$F_4 = 1,566$$

Por lo tanto el diámetro exterior del rotor es:

$$D_{ER} = [730 * (F_1 F_3) / (F_4 N)]^{1/2} \quad (8)$$

$$D_{ER} = [730 * (3,795 * 8,66) / (1,566 * 150)]^{1/2}$$

$$D_{ER} = \underline{10,1 \text{ [m]}}$$

Cálculo de la Altura del Rotor

La determinación de la altura del rotor es:

$$H_R = G_{DS}^2 / [F_4 * (D_{ER})^4] \quad (9)$$

Dónde:

H_R - Altura del rotor [m]

G_{DS}^2 = Momento de inercia del generador [t-m²]

Para calcular el momento de inercia del generador, se debe calcular primero la constante de inercia del generador por medio de:

$$H = [0,54 * \ln P_{AG}] + 0,3 \quad (10)$$

Donde:

H - Constante de inercia kW-s/kVA,

P_{AG} - Potencia nominal del generador en [MVA].

$$H = [0,54 * \ln (432)] + 0,3$$

$$H = 3,576 \text{ [kW-s/kVA]}$$

El momento de inercia natural del generador se calcula con:

$$G_{DS}^2 = [H * (P_{AG} * 109)] / (1\ 370,1 * N^2) \quad (11)$$

$$G_{DS}^2 = [3,576 * (432 * 109)] / [1\ 370,1 * (150)^2]$$

$$G_{DS}^2 = \underline{50\ 112,546 \text{ t-m}^2}.$$

Ahora con este valor de momento de inercia natural se calcula la altura el rotor que es:

$$H_R = 50\ 112,546 / [1,566 * (10.1)^4]$$

$$H_R = \underline{3,075 \text{ [m]}}$$

Cálculo del Diámetro del Foso del Generador

Para determinar el diámetro del foso del generador se usa la siguiente expresión:

$$D_{FG} = D_{ER} + 4,5 \quad (12)$$

Donde:

D_{FG} - Diámetro del foso del generador [m],

D_{ER} - Diámetro exterior del rotor [m].

Con lo que el diámetro del foso del generador es:

$$D_{FG} = 10,1 + 4,5$$

$$D_{FG} = \underline{14,6 \text{ [m]}}$$

Cálculo de la Altura del Foso del Generador

La altura del foso del generador se determina con:

$$H_{FG} = H_R + 2,3 \quad (13)$$

Dónde:

H_{FG} - Altura del foso del generador [m],

H_R - Altura del rotor [m].

Por lo tanto la altura del foso del generador es:

$$H_{FG} = 3,075 + 2,30$$

$$H_{FG} = \underline{5,375 \text{ [m]}}$$

Cálculo preliminar de la capacidad de la Grúa de Casa De Máquinas

Para determinar la capacidad preliminar de la grúa viajera de casa de máquinas se requiere conocer primero el peso del rotor del generador, ya que esta pieza define la capacidad de la grúa.

Datos:

P_{AG} - Potencia aparente del generador [MVA] = 432 MVA

N - Velocidad nominal = 150 [rpm].

Para estimación preliminar del peso del rotor del generador se utiliza la ecuación siguiente:

La fórmula es aplicable para generadores con velocidades síncronas arriba de 100 rpm.

$$W_R = 50 (P_{AG} / N^{0,5})^{0,74} \quad (14)$$

Dónde:

W_R - Masa del rotor en [ton].

P_{AG} - Potencia aparente del generador [MVA].

N - Velocidad nominal [rpm].

Entonces la masa del rotor es:

$$W_R = 50 [432 / (150)^{0,5}]^{0,74}$$

$$W_R = 698.35 \text{ ton}$$

Considera una tolerancia de $\pm 10 \%$, la masa estimada del rotor es:

$$W_R = 768,185 \text{ ton}$$

Para fines prácticos y considerando un valor comercial, se utilizarán dos grúas de:

$$W_R = 400 \text{ [ton]}$$

De acuerdo los valores obtenidos, y realizando las mismas operaciones pero para una central de 700 MW, la cual fue la primera propuesta especificada para el desarrollo del proyecto, obtenemos los siguientes datos:

		Proyecto Hidroeléctrico de 750 MW	Proyecto Hidroeléctrico de 700 MW
Turbina	Potencia de diseño Turbinas	376 670 [kW]	350 000 [kW]
	Velocidad nominal	150 [rpm]	163.6 [rpm]
	Número de polos	48	44
Generador	Potencia nominal	432 [MVA]	401.5 [MVA]
	Diámetro exterior del rotor	10.1 [m]	9.42 [m]
	Altura del rotor	3.075 [m]	3.05 [m]
	Diámetro del foso del generador	14.6 [m]	13.9 [m]
	Altura del foso del generador	5.375 [m]	5.35 [m]
	Peso del rotor	768.1 [ton]	640. 6 [ton]

De acuerdo la tabla comparativa, se puede observar que un error desde la etapa de estudios, conlleva a errores afectaciones en cascada, es decir, una mala selección de los niveles hidráulicos afectan desde la potencia de la turbina, hasta la potencia del generador y dimensiones de la Casa de Máquinas. Estos errores llegan a afectar no solamente la parte civil en cuestión de las cimentaciones, sino también los aspectos electromecánicos, y por consiguiente, los económicos en el desaprovechamiento de energía.

Ejemplo 2:

Selección de equipos principales y auxiliares para un proyecto Hidroeléctrico.

En la tabla siguiente se incluyen las características generales aplicables al Ejemplo anterior para un proyecto de 750 MW, así como algunas de las normas aplicables para los equipos y materiales eléctricos en una etapa de diseño para planeación del proyecto.

Equipo Eléctrico Principal

N°	Cantidad	Concepto	Principales Normas Aplicables	Parámetros Técnicos	Descripción
1	2 unidades	Generador síncrono de eje vertical	CFE-W4200-12 IEC 60034 IEEE-1095	Potencia nominal continua (MVA): 432	De acuerdo a la potencia obtenida en el Ejemplo 1, se calcula la corriente que tendrá el generador a la salida de sus terminales considerando diferentes niveles de tensión eléctrica. Para este caso se determinó que un nivel de tensión de 17 kV era el más adecuado para su diseño, ya que una tensión mayor elevaría el costo del generador, y una tensión menor elevaría la corriente en los bornes de salida del generador, y por consiguiente, los buses deberían ser de características mayores.
				Tensión nominal (kV): 17	
				Frecuencia (Hz): 60	
				Velocidad nominal (rpm): 150	
				Sentido de giro: contrario a las manecillas del reloj visto desde arriba	
2	2 unidades	Sistema de Excitación	CFE-W4101-16 IEEE - 421.1	Tipo: Estático por medio transformadores tipo seco.	El sistema de excitación seleccionado es del tipo estático, ya que de haberse seleccionado un generador tipo brushless, se requeriría de un generador de mayor peso.
3	1 pieza	Bus del Generador	CFE-V3000-30 IEEE – C37.23	Tipo: Fase aislada	De acuerdo a las normas indicadas, para el nivel de corriente al que operará el bus, el tipo de bus corresponde a un bus de fase aislada.

4	7 unidades	Transformador de potencia	CFE-K0000-06	Capacidad (kVA): 90/120/150	De acuerdo con la potencia instalada en la central por cada grupo generador, el transformador de potencia a utilizar corresponde a unidades monofásicas conformadas por 2 bancos de transformación para cada unidad y un transformador monofásico de reserva en caso de falla de alguna de las unidades. La selección de una unidad trifásica correspondería a un equipo de características especiales y con dimensiones extraordinarias, por esta razón se seleccionan unidades monofásicas.
				Relación de transformación (kV): 17/400	
				Tipo de transformador: monofásico	
				Tipo de enfriamiento: ONAN/ONAF/ONAF	
				Frecuencia (Hz): 60	
				Conexión: delta-Estrella	
				Impedancia garantizada (%): 12	

5	1 pieza	Subestación Eléctrica	CFE-VY200-40	Tipo: Encapsulada en SF ₆	La determinación para el uso de una subestación encapsulada se da al evaluar la posibilidad de usar una subestación convencional, con arreglo de interruptor y medio, y definir que el espacio que requiere la subestación convencional es muy grande. Para definir la mejor alternativa, se debe realizar una estimación económica y comparar los diferentes factores que intervienen: técnicos, económicos, ambientales y sociales.
				Servicio: Interior	
				Tensión nominal (kV): 400	
				Arreglo: Interruptor y medio	

6	1 lote	SCADA	IEC 61850 IEC.60870 – 5-101/103/104	Completo para automatización de la Central.	La robustez del sistema SCADA dependerá de las características de control que se requieran.
---	--------	-------	--	---	---

Equipos y Sistemas Auxiliares Eléctricos

7	3 piezas	Tableros de Media Tensión	CFE-V6000-39 IEC 62271	Tipo: Metal-Clad Nivel de tensión: 17 kV Tipo de servicio: interior
8	1 lote	Tableros de Servicios Auxiliares	CFE-V6700-32 IEC 60947	Tableros de distribución de corriente alterna: 220 Vc.a. y 480 Vc.a.
				Tableros de distribución de corriente directa: 125 Vc.d.
9	1 lote	Tableros de Protección	CFE-GCU00-69 IEC 60255	Tableros de protección para generador-transformador por medio de relevadores.
				Tableros de protección para subestación por medio de relevadores.
10	2 unidades	Transformador tipo seco	CFE-K0000-17 IEEE C57.12.01 IEC 60076	Transformador para alimentación de servicios auxiliares. Relación 17/0,48 kV, Delta-estrella con neutro aterrizado, enfriamiento OA, potencia a definir en ingeniería de detalle.
11	1 lote	Conductores de Fuerza	NMX-J-012	Conductores c/aislamiento y cubierta termofijos (XPR), libre de halógenos, resistente a la propagación de incendios, para instalaciones hasta 600 V y 90°C.
				Material: Cobre

12	1 lote	Cables de Potencia	CFE-E1000-16 IEC 60502-2	Tensión nominal: 17 kV
				Tipo de aislamiento: XLPE
13	1 lote	Cables de Control	CFE-E0000-26 IEC 60227	Tensión nominal (V): 125 Vc.d.
				Tipo de aislamiento: XPR libre de halógenos.
14	1 lote	Charolas	CFE-57000-59 IEC 61537	Para las trayectorias de los cables de baja y media tensión. En forma de ménsula alineadas, formando una trayectoria continua, construidas con material metálico, conformada por herrajes, accesorios, placas, tubos o rodillos.
15	1 lote	Sistema de Alumbrado	CFE-00F20-44 IEC 61347-2-13	Iluminación interior y exterior de la Central por medio de tecnología LED.
16	2 Bancos	Banco de Baterías	CFE-V7100-19 IEC 60623	Tensión nominal (V): 125 Vc.d.
				Tipo de construcción: níquel-cadmio
				Capacidad: A definir una vez definidos los servicios auxiliares esenciales de corriente directa.

17	2 Unidades	Cargador de baterías	CFE-V7200-48 IEC 60146-1	Tensión de alimentación: 480Vc.a.
18	1 lote	Sistema de Tierras	IEEE Std 80-2000	Para toda la instalación
19	1 Unidad	Planta diesel	CFE-W4700 IEC 60034-22	Tensión de generación 480 Vc.a.
				Capacidad a definir una vez definidos los servicios auxiliares esenciales.

4.4. Distribución de Costos en Grandes Central Hidroeléctrica

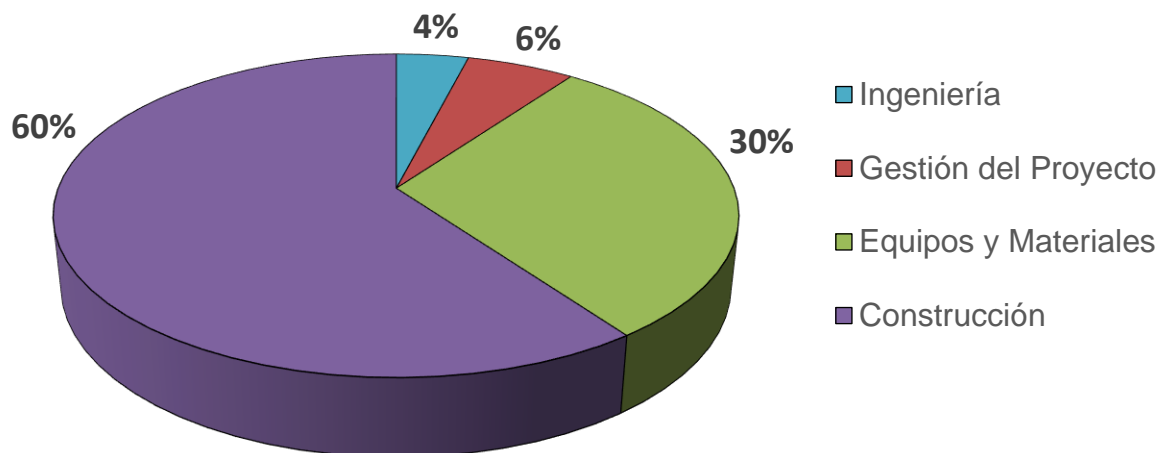
El análisis de costos en un proyecto hidroeléctrico, debe contemplar los siguientes aspectos fundamentales: Costo de la obra civil, costo de equipos electromecánicos, ingeniería y costos administrativos (planificación de tiempos, permisos y concesión de licencias, monitoreo y coordinación del personal, vida útil de la Central, gastos de inversión, etc.).

La distribución de costos en Grandes Centrales Hidroeléctricas dependerá de las características y necesidades de cada proyecto. En la Tabla 4 y en la Gráfica 1, se muestra una estadística aproximada de la distribución de costos generales en Centrales hidroeléctricas, de acuerdo con los principales gastos que se requieren en un proyecto.

- **Tabla 5. Distribución de costos en Grandes Centrales Hidroeléctricas**

Distribución de Costos en Grandes Centrales Hidroeléctricas	
<i>Ingeniería</i>	4%
<i>Equipo y Materiales Eléctricos</i>	30%
<i>Gestión del proyecto</i>	6%
<i>Construcción</i>	60%

Distribución de Costos



Gráfica 1. Distribución de costos en Grandes Centrales Hidroeléctricas.

Como se puede apreciar en los datos obtenidos de la gráfica anterior, los equipos y materiales electromecánicos son el segundo gasto principal dentro los costos de un proyecto hidroeléctrico, constituyendo aproximadamente un total del 30% del valor total. Por esta razón, es importante mencionar que un buen diseño de una central no solamente incluirá un ahorro en la ingeniería, en la cual se ahorrarán tiempos en los diseños, sino que también existirá un ahorro implícito en materiales y equipos, lo cual conlleva a un ahorro económico aún mayor.

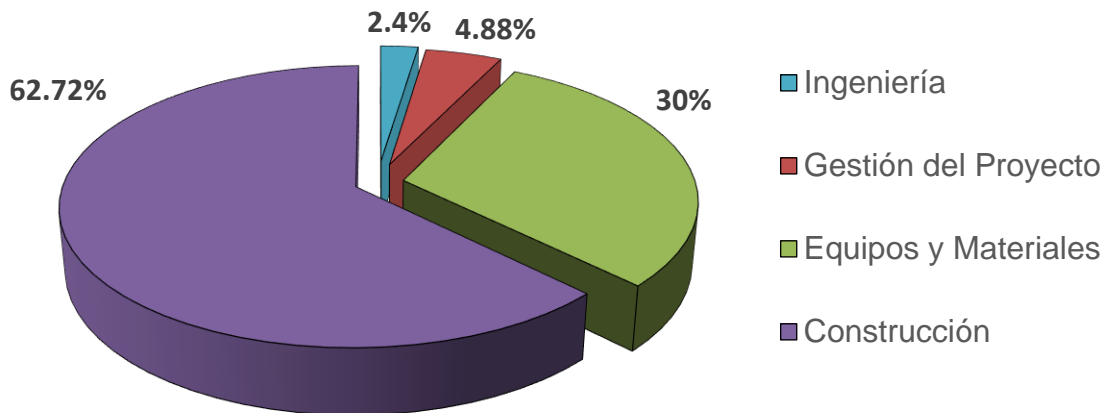
A continuación se muestran dos ejemplos en los que al existir un error en los estudios de prefactibilidad y factibilidad, implican en el costo final de un proyecto, y por consiguiente, pérdidas que en algunos casos llegan a hacer que los proyectos ya no sean factibles.

Ejemplo 3:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA (750 MW)

Distribución de Costos – La Yesca		
Ingeniería	\$15,480,000 usd	2.4%
Gestión	\$31,476,000 usd	4.88%
Construcción	\$404,544,000 usd	62.72%
Equipos	\$193,500,000 usd	30%
TOTAL	\$645,000,000 usd	100%

Distribución de Costos P.H. La Yesca



De acuerdo con estos datos, el costo estimado para el proyecto es de \$645,000,000 Usd, sin embargo, el costo final del proyecto fue de un 30% más del valor estimado^[11], ya que se tuvo que realizar desplazamiento de roca debido a fallas geológicas que se presentaron en la zona. Este costo extra provocó grandes problemas técnicos y económicos que pusieron en duda la viabilidad del proyecto, siendo que pudieron haberse evitado con un correcto estudio del terreno desde las etapas preliminares al diseño.

Esta afectación no solamente afecta la parte de obra civil, sino que también la parte electromecánica, ya que al existir una falla se requiere reubicar la Casa de Máquinas y definir cuál es la mejor opción para ésta, ya sea que requiera ser construida en caverna o en exterior, además de tener que recalcularse las potencias para el diseño de los equipos.

Por esta razón, es importante que cada una de las áreas que participan en los proyectos hidroeléctricos realice los estudios pertinentes y se coordinen para evitar costos adicionales o retrasos en la entrega de los proyectos.

Para este caso, debieron haberse estudiado las características del terreno para conocer si es una zona de riesgo que pueda complicar el diseño o la construcción, como es el caso de:

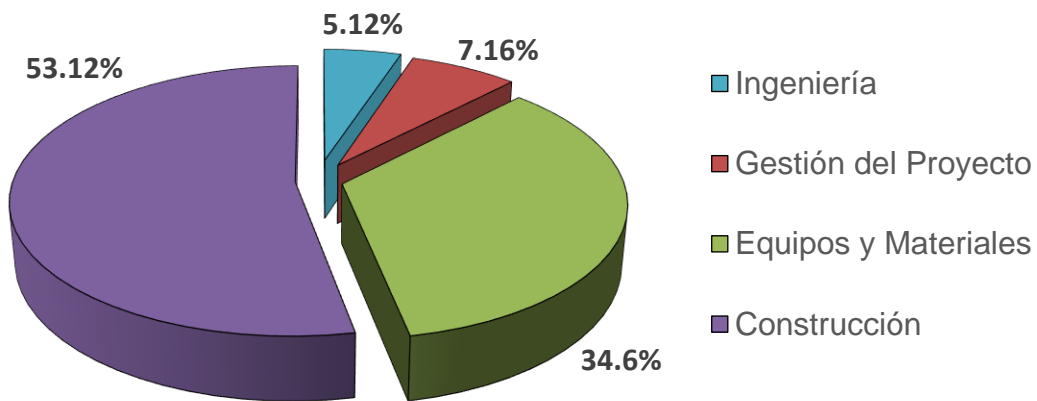
- Zonas sísmicas
- Terrenos inestables de acuerdo a su tipo de suelo.
- Zonas propensas a desprendimientos de roca en sus alrededores
- Zonas en las que existan residuos peligrosos

Ejemplo 4:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO CHICOASÉN II (240 MW)

Distribución de Costos - Chicoasén II		
Ingeniería	\$16, 525, 000 usd	5,12%
Gestión	\$23, 103, 000 usd	7,16%
Construcción	\$171,475,000 usd	53,12%
Equipos	\$111,670,000 usd	34,6%
TOTAL	\$322, 773, 000 usd	100%

Distribución de Costos P.H. Chicoasén II



Actualmente la construcción del proyecto Chicoasen II ha sido detenido en varias ocasiones por problemas sociales, por lo que su futuro es incierto. Estos problemas sociales han hecho que el proyecto sea inviable, ya que con el paso del tiempo se han ido incrementando los costos, lo cual lo hace poco redituable [111].

Como se puede ver en este ejemplo, existen ocasiones en que las complicaciones no siempre forman parte de los estudios de factibilidad de las diferentes áreas de ingeniería de un proyecto, existen ocasiones en que los problemas están fuera del alcance de éstos.

En este caso se presentó un problema social, pero pueden existir otros tipos de problemas como son: ambientales, ecológicos, permisos de uso de suelo, vegetación, invasión de zonas agrícolas, arqueológicas, etc.

Estos problemas sociales también tienen un impacto dentro del diseño y selección de Materiales y Equipos, ya que en ocasiones es necesario modificar los diseños que se tenían planeados inicialmente, y obligan a modificar obras civiles y equipo electromecánico, ya sea por modificación de trazo de caminos, líneas de transmisión, ocupación de predios para la subestación eléctrica, etc.

4.5. Resumen de los beneficios obtenidos con una correcta selección de materiales y equipos eléctricos

Como se puede observar en los Ejemplos, los valores porcentuales de las diferentes actividades requeridas para el desarrollo de un proyecto hidroeléctrico no siempre son iguales, pero existe similitudes entre éstos. Las características requeridas para cada Central Hidroeléctrica serán específicas de cada proyecto y esto puede hacer que los valores porcentuales de cada actividad sean mayores o menores, dependiendo de los requerimientos que se deseen.

El propósito de tener una correcta selección de materiales y equipos eléctricos, es que los parámetros utilizados sean los específicos para cada proyecto hidroeléctrico, evitando costos extraordinarios que hagan poco redituable la realización de un proyecto, como es el caso del Ejemplo 1, en el cual un error provoca costos adicionales al tener que realizar reingeniería, y en casos peores, llegar tener equipos mal seleccionados y comprar materiales innecesarios.

Es importante considerar que la selección de materiales y equipos sea específica de acuerdo a los requerimientos necesarios de cada proyecto, para esto es importante considerar las normas aplicables para cada equipo, y así evitar una mala selección, y además proporcionar confiabilidad y calidad en el servicio.

Una coordinación entre las diferentes áreas de ingeniería que participan en un proyecto Hidroeléctrico traería como beneficio la reducción de los costos de ingeniería, ahorro de tiempo en horas hombre, una finalización del proyecto en un tiempo adecuado y sin retrasos, además de brindar otros beneficios implícitos como es el caso de ahorro en la selección de materiales y equipos.

Conclusiones:

Esta tesina tuvo como objetivo principal, mencionar las consideraciones generales para la selección de equipos y materiales eléctricos en grandes centrales hidroeléctricas, para obtener un beneficio económico en la realización de un proyecto, así como las diferentes áreas que intervienen en el proceso de construcción, y el impacto importante que tienen durante la etapa de diseño y la selección de equipos.

El interés de llevar a cabo esta tesina nació por los problemas que se llegan a ver día con día en el campo laboral, en el cual muchas veces se presenta información de estudios e incluso de informes de ingeniería básica, con equipos y materiales de características extraordinarias que muchas veces encarecen los diseños y los hacen poco viables, además de retrasar la puesta en marcha de la Central.

Se debe tomar en cuenta que todas las diferentes áreas que participan en proyectos de Grandes Centrales Hidroeléctricas deben estar en constante comunicación para evitar errores en los diseños, y así obtener un beneficio económico, pero no sólo en la selección de materiales y equipos, sino también en la etapa de ingeniería y construcción.

Aunque algunas veces existen factores que retrasan los proyectos, como es el caso de los aspectos ambientales y sociales, los cuales muchas veces no están en nuestro alcance, se puede trabajar en tratar de evitar estas zonas y evitar tener problemas a futuro. Muchas veces se llegan a encontrar proyectos factibles para una determinada zona, pero hay ocasiones en que su desarrollo, lamentablemente, llega a ser impedido por las autoridades de las regiones o por las características naturales del sitio, como es el caso de fallas geológicas.

De manera general, con la información presentada en esta tesina, se muestra que existen diferentes parámetros en los que se puede obtener un ahorro económico en un proyecto hidroeléctrico aplicando las respectivas normas para cada equipo y material, lo cual es uno de los principales objetivos que siempre se busca por parte de las empresas.

Referencias

- [1] Tafolla R., 2014. *Consideraciones Generales para Optimizar el Diseño Electromecánico de Subestaciones de Transmisión*. Tesis. México.
- [2] Luis Merino. Las energías renovables. Energy Management Agency Europe, 2012.
- [3] World Energy Council. *World Energy resources*, 2016.
- [4] IEA (International Energy Agency). 2015.
<https://www.iea.org/topics/renewables/subtopics/hydropower/>
- [5] Alfaro L., 2016. *Predimensionamiento de Casa de Máquinas*. Curso CFE. México
- [6] Warnick C., 1984. *Hydropower Engineering*. Estados Unidos.
- [7] Ortiz R., 2001. *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Editorial Mc Graw Hill. Colombia.
- [8] IEC 60038. *Standard Voltages*
- [9] Reglamento de la Ley de la Industria Eléctrica. *Diario Oficial de la Federación*. México
- [10] José Raúl Martín. *Diseño de subestaciones eléctricas*. Primera edición. Editorial Mc Graw Hill. México. 1987.
- [I] Naciones Unidas
<http://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>
- [II] Grupo Expansión / CNN
<http://expansion.mx/economia/2012/11/06/la-yesca039-cuesta-30-mas-al-gobierno>
- [III] Eje Central
<http://www.ejecentral.com.mx/cancelan-chicoasen-ii-proyecto-clave-de-cfe/>