



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

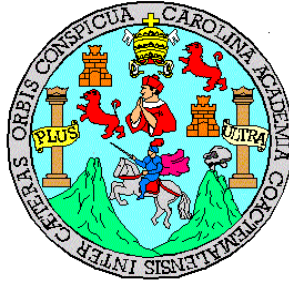
**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR MEDIO DE UNA
HIDROELÉCTRICA DE BOMBEO UTILIZANDO AGUAS
MUNICIPALES DE LA ANTIGUA GUATEMALA**

CARLOS ANDRÉS NG HO

ASESORADO POR EL ING. MAURICIO VELÁSQUEZ

Guatemala, noviembre de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR MEDIO DE UNA
HIDROELÉCTRICA DE BOMBEO UTILIZANDO AGUAS
MUNICIPALES DE LA ANTIGUA GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS ANDRÉS NG HO

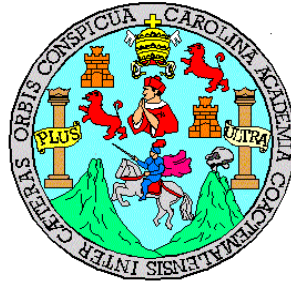
ASESORADO POR ING. MAURICIO VELÁSQUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Francisco Gressi
EXAMINADOR	Ing. Enrique Edmundo Ruiz
EXAMINADOR	Ing. Fernando Waldemar de León Contreras
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presenta a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR MEDIO DE UNA HIDROELÉCTRICA DE BOMBEO UTILIZANDO AGUAS MUNICIPALES DE LA ANTIGUA GUATEMALA,

tema que me fuera asignado por la dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 24 de enero de 2005.

Carlos Andrés Ng Ho

ACTO QUE DEDICO A:

- DIOS** Por haberme guiado en la toma de mis decisiones durante la carrera universitaria.
- MIS PADRES** Por el apoyo incondicional que siempre me han brindado para concluir satisfactoriamente mis estudios.
- MI FAMILIA** A todos en general por su apoyo.
- MIS AMIGOS** Por alentarme a seguir adelante con mis sueños y esperanzas.

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS

Por su apoyo espiritual en todos los momentos de mi vida, en especial aquellos en donde debí enfrentar situaciones difíciles, a lo largo de la carrera universitaria.

MIS PADRES

Pui Wah Ng (que en paz descanse) y Tung Mei Ho, por todo su apoyo a lo largo de toda mi vida y más durante mi carrera universitaria, ya que sin él no la hubiese concluido.

MIS HERMANOS

Suk Mei, Kin Kou, Pedro Pablo, Kin Fai y en especial a María Victoria, porque siempre me han dado su apoyo y cariño, lo que me ha dado la fortaleza y el ánimo para concluir mi carrera universitaria.

MI PADRINO

CARLOS ANZUETO

Por estar siempre pendiente de mis logros como estudiante y alentarme para ser un hombre exitoso.

ING. MAURICIO VELÁSQUEZ

Por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de graduación, ya que sus consejos y observaciones contribuyeron al mejoramiento del mismo.

MIS CUÑADOS Y SOBRINITOS

Ya que ahora forman parte de mi vida y le brindan alegría.

MIS AMIGOS

Luis Carlos, Leandro Felipe, Luisa, Brígida y Sindy ya que siempre estuvieron a mi lado brindándome su amistad y apoyo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO.....	XI
OBJETIVOS.....	XV
RESUMEN.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
JUSTIFICACIÓN.....	XXI
1. CONCEPTOS BÁSICOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA ALTERNA.....	1
1.1 El principio básico de generación de energía eléctrica.....	1
1.1.1 La ley de inducción de Faraday.....	1
1.1.2 La ley de Ampere.....	2
1.2 El generador eléctrico.....	3
1.2.1 Principio de funcionamiento de generador eléctrico.....	3
1.2.2 Tipos de generadores eléctricos.....	4
1.2.2.1 Generadores sincrónicos.....	4
1.2.2.2 Generadores de inducción.....	10
1.2.2.3 Generadores de corriente directa	10
1.2.3 Selección apropiada del generador eléctrico.....	11
1.2.3.1 Potencia generada.....	11
1.2.3.2 Eficiencia de generador.....	13
1.2.3.3 El factor económico para su selección.....	13

1.3 Principales métodos de generación de energía eléctrica, sin derivados del petróleo.....	14
1.3.1 Energía eólica.....	14
1.3.2 Energía eléctrica por medio de hidroeléctricas.....	14
1.3.3 Energía geotérmica.....	15
2. CINEMÁTICA DE FLUIDOS.....	17
2.1 Concepto de volumen de control.....	17
2.2 Tipos de flujo.....	19
2.2.1 Flujo turbulento.....	19
2.2.2 Flujo ideal.....	20
2.2.3 Flujo rotacional.....	20
2.3 Líneas de tubos de corriente.....	21
2.4 Conservación de la masa: ecuación de continuidad.....	22
2.5 La ecuación de Bernoulli.....	25
3. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	33
3.1 Descripción general del funcionamiento de una central hidroeléctrica...33	
3.1.1 Elementos que conforman una central hidroeléctrica.....	33
3.1.2 Tipos de turbinas utilizadas en hidroeléctricas.....	34
3.1.2.1 Características y aplicaciones de cada tipo de turbina.....	35
3.1.2.2 Selección de turbinas para generación de energía.....	35
3.1.3 Funcionamiento y requerimientos de una hidroeléctrica.....	37
3.2 Tipos de hidroeléctricas.....	38
3.2.1 Centrales hidroeléctricas “a filo de agua”.....	41
3.2.2 Centrales hidroeléctricas con embalse de reserva.....	41
3.2.3 Centrales hidroeléctricas de bombeo.....	42

4. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE BOMBEO.....	43
4.1. Ventajas que presenta una central hidroeléctrica de bombeo.....	43
4.2. Elementos que conforman el sistema	43
4.3. Factores importantes en el diseño	47
5. DISEÑO DEL PROYECTO.....	49
5.1 El proyecto: Hidroeléctrica de bombeo para la Antigua Guatemala	49
5.1.1 Características del proyecto.....	49
5.1.2 Beneficios de la hidroeléctrica de bombeo.....	50
5.2 Evaluación del área geográfica para las instalaciones de la hidroeléctrica de bombeo.....	51
5.2.1 Altura de los depósitos de agua.....	51
5.2.1.1 Localización del depósito principal.....	51
5.2.1.2 Localización del depósito de recibo, posición del generador.....	51
5.3 Determinación de los parámetros de generación.....	52
5.3.1 Nivel de tensión y frecuencia de la señal.....	52
5.3.2 Determinación de la carga del sistema.....	52
5.3.2.1 El generador eléctrico.....	53
5.4 Características de los elementos que conforman el sistema de generación.....	53
5.4.1 Tuberías de transporte.....	54
5.4.1.1 Diámetro de las tuberías.....	54
5.4.1.2 Presiones que deben soportar.....	56
5.4.2 Turbina del generador.....	57
5.4.2.1 Determinación del tipo de turbina a utilizar.....	57
5.4.2.2 Acoplamiento del generador con la turbina.....	74

5.4.3 Bombas hidráulicas para retorno a depósito principal.....	74
5.4.3.1 Determinación de la cantidad de bombas y potencia requerida.....	75
5.4.4 Sistema de medición y protección del generador eléctrico.....	77
5.4.4.1. Medidor de energía trifásico.....	77
5.4.4.2. Red de tierras.....	77
5.4.5 Diagramas del proyecto.....	78
5.4.5.1. Esquema general.....	78
5.4.5.2. Dimensiones de la casa de máquinas de la central hidroeléctrica.....	83
5.4.5.3. Montaje de la turbina hidráulica.....	86
5.4.6. Diagramas eléctricos.....	88
5.4.6.1. Diagrama unifilar del sistema de generación.....	88
5.4.6.2. Diagrama desarrollado del sistema de generación.....	91
5.4.6.3. Diagrama unifilar del sistema de regulación de velocidad de la turbina.....	94
5.4.6.4. Diagrama desarrollado del sistema de regulación de velocidad de la turbina.....	97
5.4.6.5 Diseño del panel eléctrico para el sistema de control de flujo.....	99
CONCLUSIONES.....	101
RECOMENDACIONES.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Representación de la ley de inducción de Faraday.....	2
2. Representación de la ley de Ampere.....	3
3. Máquina de corriente directa con el campo conectado en derivación.....	11
4. Generador eléctrico acoplado a un transformador de potencia.....	13
5. Líneas de tubos de corriente de un fluido.....	22
6. Desplazamiento de un flujo no viscoso en agua.....	26
7. Turbina Kaplan.....	37
8. Central hidroeléctrica.....	41
9. Embalse inferior y tubo de alivio	45
10. Transmisor de presión diferencial.....	55
11. Medidor de flujo tipo magnético.....	56
12. Representación vectorial de las velocidades del agua en la turbina hidráulica..	67
13. Esquema del sistema de control de los niveles de agua.....	73
14. Acoplamiento de los generadores con la turbina.....	74
15. Esquema general central hidroeléctrica de bombeo para la Antigua Guatemala....	79
16. Esquema general de la obra civil del proyecto.....	82
17. Casa de máquinas central hidroeléctrica de bombeo para la Antigua Guatemala.....	85
18. Instalación de la turbina y la tubería	87
19. Diagrama unificar del sistema de generación.....	90
20. Diagrama eléctrico desarrollado del sistema de generación de la central hidroeléctrica de bombeo.....	92

21. Panel de conexiones eléctricas del sistema de generación.	93
22. Diagrama unificar del sistema de regulación de flujo.....	96
23. Diagrama desarrollado del sistema de control de flujo de la tubería.....	98
24. Panel para el controlador del sistema de regulación de flujo.....	100

TABLAS

I.	Clasificación de turbinas de acuerdo a la altura de la caída de agua	36
II.	Medidas del depósito Cerro de la Cruz, la Antigua Guatemala.....	49
III.	Clasificación de turbinas de acuerdo a su velocidad específica.....	62
IV.	Características de la bomba del pozo la Candelaria II.....	75
V.	Balance de energías de la central hidroeléctrica	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ω	Velocidad angular
P	Potencia
Δ	Diferencia
ϕ	Factor de velocidad periférica
∂	Derivada parcial
ρ	Densidad
Q	Caudal o gasto

GLOSARIO

Álabe	Se refiere a una paleta combada que forma parte de una turbina o bomba, la cual es utilizada para canalizar el fluido en la máquina rotatoria y obtener de éste la energía cinética necesaria para obtener potencia mecánica.
Central hidroeléctrica	Sistema utilizado para generar potencia eléctrica utilizando la energía cinética proporcionada por el agua, la cual es convertida en energía eléctrica por medio de un generador.
Cero	En un instrumento de medición o de control siempre se tiene un rango de valores en los cuales éste opera, el valor de referencia o de inicio es el cero del instrumento.
Conexión shunt	Se denomina de esta forma a una derivación de cableado realizada en una conexión eléctrica, puede definirse también como una conexión en paralelo.
Controlador	Instrumento que recibe una o varias señales que pueden ser neumáticas, eléctricas, etc., y haciendo un análisis proporciona una señal de salida de acuerdo a las necesidades del sistema que se está controlando.
Corriente eléctrica	Se refiere al desplazamiento de carga eléctrica de un punto a otro en determinado intervalo de tiempo, la corriente está dada en amperios.

Embalse	Estructura artificial que se construye con la finalidad de retener o almacenar el agua en una central hidroeléctrica y así obtener una diferencia de alturas.
Energía eléctrica	Es la energía que utilizan las cargas eléctricas para transportarse de un punto a otro. Puede ser generada de diversas formas.
Energía potencial	En los objetos existe una energía que siempre está presente en ellos y que en cualquier momento puede transformarse en otro tipo de energía, a una mayor altura un objeto adquiere mayor energía potencial.
Golpe de ariete	Al fenómeno que se produce cuando la velocidad de un líquido en una tubería disminuye repentinamente debido a la acción de una válvula o compuerta se le denomina golpe de ariete; dicho fenómeno produce rajaduras en las tuberías.
Presión	La fuerza ejercida por unidad de área sobre un objeto, aplicándola a tuberías, en este caso, el agua ejercerá una fuerza en las paredes de la tubería, entonces está ejerciendo una presión.
Tacómetro	Dispositivo utilizado para medir el número de revoluciones por minuto en una máquina rotatoria. Este instrumento genera un voltaje de acuerdo al número de revoluciones que mide y el cual un transductor interpreta.

Transductor IP	Elemento del sistema de control que proporciona señales neumáticas equivalentes a señales de corriente que le proporciona un transmisor o un controlador.
Transmisor de presión	Dispositivo que recibe una señal de presión, la cual puede ser manométrica, absoluta o diferencial, y proporciona como salida una señal eléctrica equivalente, por lo general esta salida es de 4 a 20 mA.
Turbina	Dispositivo mecánico utilizado para obtener la energía cinética que proporcionan algunos elementos como el agua, el aire, el vapor, etc.
Válvula neumática	Elemento final de control utilizado para variar el caudal de un fluido en una tubería, el obturador realiza la función de restringir o permitir el paso del fluido, se les llama válvulas neumáticas debido a que el actuador, es decir, el dispositivo que proporciona el movimiento se acciona con aire.
Velocidad específica	En las turbinas hidráulicas se aplica este término para definir la velocidad que adquiere una turbina con dimensiones similares a otra y que está generando potencia unitaria a altura unitaria.

OBJETIVOS

General

Diseñar una central hidroeléctrica de bombeo de pequeña escala por medio de los depósitos municipales de agua, para generar y utilizar la energía eléctrica en las bombas de distribución de agua potable en la ciudad de la Antigua Guatemala.

Específicos

1. Generar energía eléctrica por medio de la elección apropiada de una máquina sincrónica que pueda cumplir con la demanda del sistema de bombeo.
2. Implementar un sistema de regulación de velocidad en la máquina utilizada, para poder tener una buena regulación de tensión en el sistema diseñado.
3. Elegir el tipo de la turbina que proporcione la mayor eficiencia para el desarrollo del proyecto de generación.

RESUMEN

La necesidad que se presenta cada día, por crear nuevos medios para obtener energía, ya no significa solamente eso, en la actualidad, es necesario tomar en cuenta que los recursos naturales son más limitados y que el medio ambiente se contamina cada vez más. La construcción y puesta en marcha de una central hidroeléctrica trae beneficios a la población. En muchas poblaciones se instalan sistemas de generación en los ríos para generar pequeñas cantidades de energía ya que es dificultoso llevar hacia estos puntos la energía generada por las grandes centrales hidroeléctricas, pero tienen el inconveniente que cuando el afluente del río se reduce ya no es posible generar la energía necesaria. El diseño de una central hidroeléctrica de bombeo viene a solucionar en gran parte este problema ya que se utiliza de nuevo el agua que ya ha entregado su energía cinética a la o las turbinas hidráulicas.

La Antigua Guatemala, situada en el departamento de Sacatepéquez, es una población en la que afortunadamente el recurso del agua se presenta de una forma estable, por ello y utilizando los medios ya existentes, se ha decidido realizar un estudio para el diseño de una central hidroeléctrica de bombeo de pequeña escala, lo cual puede ser el inicio de esta aplicación para que las empresas generadoras de energía eléctrica puedan administrar óptimamente los recursos naturales para generar energía. Aunque la cantidad de energía generada sea pequeña, el diseño y construcción de este proyecto puede traer grandes beneficios a largo plazo a la población.

El líquido a utilizar para obtener energía cinética es el que se encuentra en un depósito en el Cerro de la Cruz de la Antigua Guatemala, el cual por medio de la fuerza de gravedad se conduciría por una tubería hasta la turbina acoplada a un generador sincrónico.

El agua después de pasar por la turbina y entregar su energía cinética caerá a un pozo, que es el punto donde actualmente se reúne el agua de varios nacimientos y se bombea hacia el depósito situado en el Cerro de la Cruz.

INTRODUCCIÓN

En los lugares en donde el agua es escasa, una de las formas de generar energía eléctrica es por medio de la misma, mediante el uso de *centrales hidroeléctricas de bombeo*, en ellas, se almacena el agua que ya ha proporcionado su energía cinética y se reutiliza, lo cual se hace bombeándola de nuevo hacia el embalse principal para que se repita el ciclo. Las bombas de agua que retornan el agua al embalse principal utilizan un pequeño porcentaje de la energía eléctrica generada, o se pueden adaptar los generadores para que estos sean también bombas de agua.

El presente diseño consiste en la determinación de los parámetros para el funcionamiento de una central hidroeléctrica de bombeo de pequeña escala, la cual requiere de dos niveles de agua para que pueda obtenerse la energía potencial de la misma, cuando circula de un punto alto hacia uno más bajo; además, se requiere de un sistema de retorno o bombeo para repetir el ciclo de generación; con los depósitos municipales de agua situados en el Cerro de la Cruz de la Antigua Guatemala, pueden obtenerse dichos niveles de agua requeridos. El proyecto dará como beneficio principal, la reducción de los costos en el consumo de energía eléctrica en el sistema de distribución de agua, aunque no lo eliminará por completo. Para los sistemas de generación de energía, los generadores más utilizados son los sincrónicos, y es por ello que se propone la utilización de un generador sincrónico para este proyecto.

Dedicamos un pequeño capítulo para explicar algunos conceptos sobre dinámica de fluidos, como por ejemplo la ecuación de Bernoulli, ya que son necesarios para calcular las presiones que generan los fluidos al circular en una tubería, cuando existe una diferencia de altura en su trayecto, esto se presenta en las centrales hidroeléctricas. El proyecto no consiste en el diseño de una turbina hidráulica, sólo nos limitaremos a guiar en la elección de la más adecuada.

JUSTIFICACIÓN

Debido a que la energía eléctrica obtenida por medio de una central hidroeléctrica no provoca contaminación al medio ambiente y su costo es relativamente bajo, la implementación de un sistema a pequeña escala de generación de energía utilizando los depósitos de un sistema de distribución municipal de agua, no los contaminarían en absoluto.

Se pretende aplicar este proyecto a un sistema municipal de distribución de agua de la ciudad de la Antigua Guatemala, debido a que si se tienen depósitos que funcionen como embalses artificiales de la hidroeléctrica, el agua podrá ser utilizada una y otra vez, obteniendo de su energía potencial la energía mecánica para repetir el ciclo de generación, gran cantidad de veces.

La obtención de energía por medio de hidroeléctricas de bombeo contribuye a utilizar de manera racional el recurso natural del agua, y si el nivel del depósito superior disminuye y el caudal de bajada es menor al de bombeo una parte de la energía generada puede ser utilizada para bombearle agua desde un pozo utilizado como embalse inferior.

1. CONCEPTOS BÁSICOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA ALTERNA

Este primer lo dedicaremos a la descripción de los principios básicos de la generación de energía eléctrica. Describiremos algunas leyes que fueron postuladas en el electromagnetismo y son la base del funcionamiento de los equipos utilizados en la generación de energía eléctrica.

1.1 El principio básico de generación de energía eléctrica

Las cuatro leyes postuladas por Maxwell, son la base fundamental del electromagnetismo, estas leyes establecen los principios básicos de generación de energía eléctrica y por ello es necesario hacer una mención de dos de ellas: la ley de inducción de Faraday y la ley de Ampere.

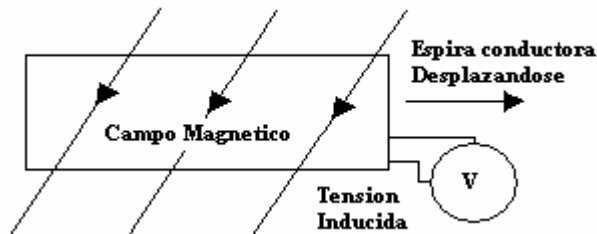
1.1.1 La ley de inducción de Faraday

La ley de inducción de Faraday forma parte de las cuatro leyes del electromagnetismo postuladas por Maxwell, en esta ley se establece que el movimiento variante de una espira cerrada de material conductor a través de un campo magnético induce en ella un voltaje. En un generador eléctrico tenemos un imán, que no es permanente, ya que está formado por la circulación de la corriente en los devanados del rotor, y un grupo de bobinas conductoras que varían su posición con respecto al campo magnético, estas son las del estator, y en ellas se induce un voltaje, este es el principio de generación de energía eléctrica alterna utilizando medios electromagnéticos. La siguiente ecuación describe la Ley de Inducción de Faraday:

$$\oint E \cdot ds = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad \text{(Ecuación 1.1.)}$$

La figura 1 ilustra este principio de generación de energía eléctrica.

Figura 1. Representación de la ley de inducción de Faraday



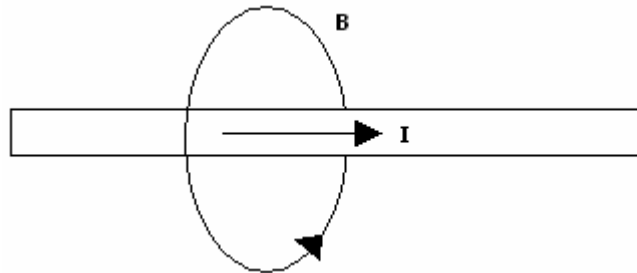
1.1.2 La ley de Ampere

La ley de Ampere también forma parte del grupo de leyes propuestas por Maxwell, la circulación de una corriente a través de un alambre conductor produce la formación de un campo magnético que lo rodea. Para determinar la dirección del campo magnético se utiliza la regla de la mano derecha. En un generador sincrónico, se alimentan las bobinas del rotor con corriente directa por medio de escobillas, el campo magnético producido es estático, si no hay movimiento entonces en las bobinas del estator no se induce ningún voltaje. Al iniciarse el movimiento del rotor energizado se induce el voltaje en las bobinas del estator, el cual se toma de las puntas de dichas bobinas. La ley de Ampere se representa con esta ecuación:

$$\oint B \cdot ds = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad (\text{Ecuación 1.2.})$$

En la figura 2 podemos observar el significado de la ley de Ampere.

Figura 2. Representación de la ley de Ampere



1.2 El generador eléctrico

El elemento principal de un sistema de generación de energía eléctrica es el generador eléctrico, es el encargado de transformar energía mecánica en energía eléctrica. La energía mecánica es obtenida de diferentes maneras, las más conocidas se describen adelante.

En la actualidad los generadores eléctricos alcanzan magnitudes bastante grandes ya que la demanda de energía y la eficiencia de los sistemas utilizados para su transmisión se han desarrollado con una eficiencia sorprendente. Como ya es sabido, los generadores de inducción generan potencia reactiva pero no activa, los generadores sincrónicos si generan potencia activa y potencia reactiva, es por ello que es preferible utilizar estos últimos para generar energía.

1.2.1 Principio de funcionamiento de generador eléctrico

Un generador eléctrico es una máquina rotatoria, la cual tiene su principio de funcionamiento en la ley de inducción de Faraday. Si una bobina de alambre se encuentra inmersa en un campo magnético, en ella se inducirá un voltaje si su posición se hace variar con respecto a la del campo. Un generador de energía eléctrica está compuesto por varias bobinas de alambre que se encuentran en su estator y en su rotor.

1.2.2 Tipos de generadores eléctricos

Básicamente se utilizan dos tipos de generadores eléctricos para generar energía eléctrica a gran escala. Los generadores eléctricos pueden ser sincrónicos y asíncrónicos o de inducción. Sin importar el tipo de generador eléctrico que se utilice, siempre se requiere de alguna forma de obtención de energía mecánica debido a que es necesario que los campos magnéticos del generador varíen para que éste pueda cumplir con su función.

1.2.2.1 Generadores sincrónicos

A estos generadores se les da este nombre porque su señal de salida es proporcional a la frecuencia que le proporciona su primotor, es decir, la fuente de energía mecánica. Los generadores sincrónicos requieren de una fuente de excitación de corriente directa para poder generar energía eléctrica alterna. El campo magnético que produce la corriente directa es estático, con el movimiento que proporciona el primotor al rotor se induce tensión en los devanados del estator.

Un alternador es similar en construcción a un motor síncrono de rotor excitado; éste consiste en un estator con arrollamiento trifásico y un rotor de polos inductores salientes excitados con corriente continua. La presencia o ausencia de jaula de ardilla depende del uso a que se destine el alternador.

El alternador tiene que ser accionado por un motor eléctrico, una turbina de vapor, un motor Diesel, etc. Del arrollamiento del estator, que por lo regular va conectado en estrella, salen al exterior tres hilos o cuatro si la distribución se hace con tres fases y neutro.

Para entrar en servicio un alternador se lleva primero a la velocidad de régimen y luego se excitan lentamente los polos rotóricos con corriente continua. Al girar el campo magnético creado por el rotor, el arrollamiento estatórico corta líneas de fuerza, y por tanto se induce en él una tensión. Si el estator lleva un arrollamiento trifásico, se generará una tensión trifásica; si se necesita monofásica, sólo se utilizan dos de los hilos exteriores, o, si la conexión es en estrella, un hilo de fase y el neutro.

La frecuencia de la tensión generada por un alternador es función de la velocidad y del número de polos de la máquina, la variación de la tensión de excitación no influirá sobre la frecuencia, aunque sí sobre la tensión generada por la máquina. Esta tensión varía con la carga, razón por la cual si se desea mantener la primera constante es preciso gobernar la tensión de excitación, sea manualmente, sea con auxilio de un regulador automático.

Alternador sin escobillas

El alternador sin escobillas es de construcción muy similar a la del motor síncrono sin escobillas. Los órganos giratorios son ahora el rotor del alternador, provisto de los polos inductores con su arrollamiento, el rotor de la excitatriz y el grupo de diodos semiconductores. Puesto que todos ellos giran conjuntamente con el eje del alternador, no se necesitan anillos de toma, escobillas ni colector. El arrollamiento inductor de la excitatriz se alimenta desde una red de corriente alterna monofásica, a través de un rectificador. La tensión trifásica generada por la excitatriz cuando se acciona mecánicamente su eje, se rectifica a tensión continua por medio de un puente trifásico de diodos semiconductores. Con esta tensión continua se alimenta el arrollamiento inductor de los polos rotóricos del alternador. Como este rotor también es accionado mecánicamente, las líneas de fuerza del campo rotórico cortan el arrollamiento estatórico e inducen una tensión trifásica en él.

Pueden utilizarse componentes a base de semiconductores no sólo para la rectificación, sino también para la regulación estática de la tensión, y la detección y compensación previas de las tensiones a efectos de un acoplamiento en paralelo. Es necesario que se tenga una máquina motriz para impulsar el alternador.

Acoplamiento de alternadores en paralelo

Las condiciones que se citan a continuación deben de cumplirse al momento de acoplar dos o más alternadores en paralelo:

□ Las tensiones generadas por los alternadores tienen que ser iguales, los ángulos de fase de cada uno deben de coincidir y sus frecuencias también. Suponiendo que hayan de acoplarse en paralelo dos alternadores, se ajustará primero en ambos la tensión variando la tensión aplicada al arrollamiento inductor de la excitatriz; la frecuencia se ajustará variando la velocidad de la máquina motriz.

□ Las polaridades de los alternadores deben estar sincronizadas. Esta operación se llama ***“poner los alternadores en fase”***, uno de los métodos utilizados para realizar dicha operación es aquel que se efectúa conectando tres series de lámparas. Si se supone que ambos alternadores giran a la velocidad conveniente y generan la tensión prevista, si las tres lámparas se encienden y se apagan a un mismo tiempo, se indica que ambas máquinas tienen sus ángulos de fase sincronizados. Se ajustan entonces nuevamente la tensión y la frecuencia de uno de los generadores hasta que todas las lámparas permanezcan apagadas, o si se está utilizando un sincronoscopio, que es otra forma de poner los alternadores en fase, éste se detendrá cuando las fases tengan sus ángulos iguales. En este momento puede cerrarse el interruptor trifásico, puesto que ambos alternadores cumplen las condiciones requeridas para ser acoplados en paralelo. Pero si cada serie de lámparas se enciende y apaga alternativamente, es señal de que no hay correspondencia de fases entre las dos máquinas.

En este caso basta permutar dos terminales de generador que se utilizó como base en el interruptor trifásico y efectuar seguidamente las operaciones anteriores. El método donde se utilizan lámparas para la sincronización de ángulos de fase se llama ***“todo apagado”***.

Otro sistema de sincronización es el llamado ***“uno apagado y dos encendidos”***, este último es más recomendable que el anterior. Estando ambos alternadores en marcha, sus fases estarán sincronizadas cuando un juego de lámparas permanezca apagado y los otros dos encendidos. Entonces podrá cerrarse el interruptor trifásico de acoplamiento. El voltaje y la frecuencia nominales de salida de un generador pueden ser regulados o variados conectándole cargas resistivas, capacitivas o inductivas.

Voltaje inducido en el estator

Con el inicio en la rotación del campo magnético que se genera por la energización del rotor, se induce voltaje en el estator, este voltaje inducido se expresa por medio de la ecuación 1.3.:

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_C \phi f \quad \text{(Ecuación 1.3.)}$$

La ecuación 1.3. se reduce a:

$$E_A = K \phi \omega \quad \text{(Ecuación 1.4.)}$$

debido a que la velocidad angular es función de la frecuencia de la señal y N_C es una constante de diseño.

El voltaje por fase del generador tiene dos componentes:

$$V_{\phi} = E_A + E_{estat} \quad \text{(Ecuación 1.5.)}$$

Al desarrollar las ecuaciones de cada uno de los voltajes inducidos en el generador por medio de los diagramas fasoriales, tenemos que el voltaje por fase es:

$$V_{\phi} = E_A - jX I_A - jX_A I_A - R_A I_A \quad \text{(Ecuación 1.6.)}$$

Lo cual se reduce a

$$V_{\phi} = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad \text{(Ecuación 1.7.)}$$

En la ecuación 1.7. X_S representa la reactancia sincrónica, que está compuesta por X y X_A . Para una conexión en estrella el voltaje de línea es:

$$V_L = \sqrt{3}V_{\phi} \quad \text{(Ecuación 1.8.)}$$

Para una conexión en delta:

$$V_L = V_{\phi} \quad \text{(Ecuación 1.9.)}$$

Frecuencia de la señal del generador sincrónico

La frecuencia de la señal proporcionada por el generador depende del número de polos del mismo y de la velocidad mecánica que le proporciona su primotor, se expresa con la ecuación 1.10:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad \text{(Ecuación 1.10.)}$$

f_e es la frecuencia de la señal generada

n_m es la velocidad mecánica del generador

P es el número de polos del generador

Se requiere que la frecuencia de la señal sea de 60 Hz, entonces lo que se puede hacer variar es la velocidad mecánica del generador, ya que el generador viene de fábrica con determinado número de polos sólo al hacer variar la velocidad mecánica del generador podemos variar la frecuencia de la señal. Como ejemplo, para un generador de 8 polos que debe alcanzar los 60 Hz utilizamos la ecuación 1.10 y obtenemos:

$$n_m = \frac{120 \times 60 \text{ Hz}}{8}$$
$$n_m = 900 \text{ rpm}$$

1.2.2.2 Generadores de inducción

Los generadores de inducción no cuentan con una fuente de excitación de corriente directa, en estos el estator induce una tensión en el rotor y comienza a circular una corriente en éste, con lo que se genera un campo que se opone al que produjo la inducción inicialmente, esto ocurre siempre que el primotor del generador le provea de potencia mecánica; este hecho hace que solo se genere potencia reactiva, no potencia activa. Las máquinas de inducción son utilizadas en su mayoría como motores no como generadores, siempre absorben potencia activa aunque trabajen como generadores.

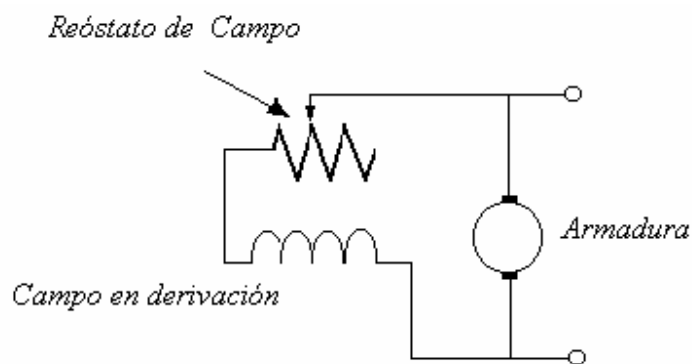
1.2.2.3 Generadores de corriente directa

Básicamente existen tres tipos de generadores de corriente directa, pero su tipo depende de la conexión de su campo, los tres tipos son: generador en derivación o conexión shunt, generador en serie, y generador compuesto o compound. Las máquinas de corriente directa que funcionan como motores tienen diferentes características que dependen de la conexión de su devanado de campo; cuando el campo de un motor de corriente directa se conecta en serie se tiene un mejor par de arranque, por lo tanto es mejor utilizar esta conexión cuando se le utiliza como motor. Cuando el motor se conecta con el campo en derivación se tiene una mejor regulación de voltaje, ya que todo el voltaje de alimentación aparece en este devanado. Una combinación de las dos conexiones mencionadas dará como resultado la mezcla de estas dos características: buena regulación de voltaje y mejor par de arranque.

Cuando se trata de un generador de corriente directa que va a ser utilizado como fuente de excitación para un generador trifásico de corriente alterna es mejor utilizar la conexión del campo en derivación o shunt, ya que se requiere que todo el voltaje generado aparezca en el devanado de campo en paralelo con la armadura y que se tenga una buena regulación de voltaje.

La regulación de voltaje se refiere a la relación de voltajes que aparecen cuando se tiene carga y cuando no se tiene, ésta se da en porcentaje. La figura 3 muestra la conexión shunt utilizada cuando la máquina de corriente directa trabaja como generador eléctrico.

Figura 3. Máquina de corriente directa con el campo conectado en derivación o shunt



1.2.3 Selección apropiada del generador eléctrico

El generador eléctrico junto con la turbina hidráulica son los elementos principales del sistema de generación, sus características deben considerarse en conjunto al momento de seleccionar estos dos elementos. Para principiar se hablará sobre algunas características importantes del generador eléctrico.

1.2.3.1 Potencia generada

Un generador eléctrico puede generar cierta cantidad de potencia, ésta es dependiente del tamaño y la capacidad de devanados con que cuenta dicho generador, la potencia de entrada y la de la salida son iguales.

El generador eléctrico es muy similar en funcionamiento a un transformador, pero en el generador se puede utilizar corriente directa, ya que con la rotación se hace variar el campo magnético dentro del estator y se induce en éste último una tensión. La potencia convertida que provee el primotor al generador se calcula con la ecuación 1.11:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m \quad \text{(Ecuación 1.11.)}$$

La ecuación 1.11 nos dice que la potencia convertida es igual al producto del par inducido y la velocidad mecánica que adquiere el eje del rotor. Al estudiar los diagramas fasoriales de la máquina síncrona y tomando el voltaje de fase como referencia, obtenemos las siguientes ecuaciones de potencia real y reactiva de línea a línea y por fase:

Valores de Salida de Línea a Línea

$$P_{SAL} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta$$

$$Q_{SAL} = \sqrt{3} V_T I_L \text{sen} \theta$$

(Ecuación 1.12.)

Valores de Salida por Fase

$$P_{SAL} = 3 V_\phi I_A \cos \theta$$

$$Q_{SAL} = 3 V_\phi I_A \text{sen} \theta$$

(Ecuación 1.13.)

El análisis de los diagramas fasoriales del generador nos demuestra que la potencia máxima que éste puede generar es:

$$P_{\max} = \frac{3 V_\phi E_A}{X_S} \quad \text{(Ecuación 1.14.)}$$

Como no hay pérdidas debido a R_s la potencia convertida es igual a la potencia de salida del generador. La potencia máxima se da cuando el ángulo entre el voltaje de fase y el voltaje interno generado es igual a 90° .

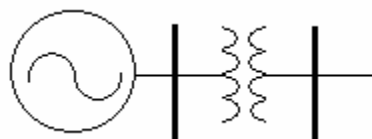
1.2.3.2 Eficiencia de generador

Cuando se habla de eficiencia en cualquier sistema, se relacionan las cantidades de entrada con las de salida. La eficiencia del generador es la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, es decir, cuanta potencia mecánica se le está proveyendo a su eje y cuanta potencia eléctrica provee éste al sistema eléctrico. Se dice que un generador es eficiente cuando la relación es cercana a un cien por ciento. Para generar energía eléctrica un generador del tipo sincrónico es más eficiente que uno del tipo inductivo.

1.2.3.3 El factor económico para su selección

Cuando se genera energía eléctrica resulta mas económico hacerlo a un nivel de tensión no muy alto para que la corriente sea alta y los aislamientos no sean muy costosos, y esta misma energía se transporta a niveles altos mediante el uso de transformadores de potencia para que la corriente sea baja ya que de esta forma las pérdidas son disminuidas considerablemente. Generar niveles de corriente muy altos tiene un costo elevado, es por ello que es mejor transportar la energía a bajas corrientes, ya que aparte de que el costo se reduce, las pérdidas que se producen con corrientes bajas son relativamente bajas. La forma en que se representa un generador acoplado a un transformador de potencia se muestra en la figura 4.

Figura 4. Generador eléctrico acoplado a un transformador de potencia



1.3 Principales métodos de generación de energía eléctrica naturales, sin derivados del petróleo.

Los principales métodos naturales de generación de energía eléctrica se describen en los siguientes párrafos. Algunos métodos son empleados ampliamente en algunas naciones, otros son utilizados en combinación con muchos otros tipos de generación.

1.3.1 Energía eólica

La energía eólica es aquella que se obtiene por medio de la transformación de la energía mecánica proporcionada por el viento en energía eléctrica. En varias naciones desarrolladas en las que se buscan constantemente nuevas formas de obtención de energía, la energía eólica es ampliamente utilizada, pero son naciones en donde existen áreas extensas y donde los vientos son abundantes. Es una forma de obtención de energía con niveles de contaminación bastante bajos. Se requiere de conocimientos aerodinámicos para el diseño de las turbinas eólicas, ya que se tiene que mantener una velocidad constante en las mismas aunque el viento se mueva en forma variable.

1.3.2 Energía eléctrica por medio de hidroeléctricas

Ésta es una de las formas de generación de energía eléctrica más ampliamente utilizada, tiene muchas ventajas, produce bajos niveles de contaminación y los costos de mantenimiento son bajos. Con este tipo de obtención de energía es necesario utilizar turbinas hidráulicas, las cuales se eligen de acuerdo a la altura de la caída de agua. Para las centrales hidroeléctricas el ciclo de generación se repite siempre, es decir, que en las temporadas de lluvia se almacena una cantidad suficiente de agua cada día en su embalse y con ella se puede generar durante varias semanas. En las temporadas secas, el uso del agua debe ser monitoreado constantemente. En poblaciones donde el recurso del agua es limitado se están implementando las centrales hidroeléctricas de bombeo.

1.3.3 Energía geotérmica

La energía geotérmica es aquella que se obtiene por medio del flujo de vapor que se genera en el centro de la tierra, este flujo se utiliza para mover turbinas acopladas a generadores eléctricos. La termodinámica se dedica a estudiar el calor producido en el interior de la Tierra, localizando yacimientos naturales de agua caliente, el vapor que se produce es utilizado para generar potencia mecánica que luego es transformada en energía eléctrica. La desintegración de elementos radiactivos es la que genera principalmente este tipo de energía entre la corteza y el manto superior de la Tierra. En el interior de la Tierra circula roca fundida o magma, y el agua que circula también en el interior de la Tierra crean manantiales calientes y géiseres, fuentes que son aprovechadas para generar energía.

2. CINEMÁTICA DE FLUIDOS

Los conceptos manejados en la cinemática de fluidos son necesarios para los estudios que se realizan en el diseño de una central hidroeléctrica, aunque son sólo una parte de los tantos estudios que deben realizarse.

2.1 Concepto de volumen de control

Se pueden definir a las ecuaciones básicas de la dinámica de fluidos, desde un punto de vista lagrangiano, como aquellas que se deducen para una masa de fluido dada. La analogía del “sistema cerrado” es una aproximación utilizada en la termodinámica.

En un fluido que se encuentra en movimiento, el movimiento de sus capas se da de una forma desordenada. Se puede considerar a las capas como independientes unas de otras, ya que el contacto entre ellas se pierde, se mezclan, su posición y orientación son difíciles de predecir. Si se desea considerar al fluido como un sistema de masa fija para deducir las ecuaciones de la dinámica de fluidos, esto se tornará casi imposible o extremadamente difícil.

Desde un punto de vista euleriano, utilizado para analizar la mayoría de sistemas en la dinámica de fluidos. Es necesario considerar un volumen de control fijo, es decir, un punto fijo en el espacio, luego de esto las ecuaciones se deducirán para expresar cambios en la masa, momentum y energía a medida que el fluido vaya pasando a través o cerca del volumen o punto fijo.

Otra definición importante es la de superficie de control, la cual es la frontera de un volumen de control. No son importantes la forma y el tamaño del volumen de control ya que puede ser de cualquier tamaño o forma, por lo general el volumen de control es igual a las fronteras sólidas por donde circula el fluido; para simplificar problemas, el volumen de control muchas veces es dibujado perpendicularmente a la dirección del flujo. Con el enfoque euleriano se llega a la descripción de sistema abierto.

Con los métodos lagrangianos o eulerianos se pueden analizar los sistemas desde dos puntos de vista, el nivel macroscópico y el nivel de campo. En un análisis realizado en el nivel macroscópico las leyes deducen volúmenes de control que tienen masa finita, y se calculan una serie de integrales de las variables. Cuando se requiere información de los cambios en los parámetros punto a punto dentro del volumen de control este análisis no es muy eficiente ya que solamente, como ya se mencionó, se calculan integrales de las variables; este nivel de abstracción será útil para estimaciones iniciales. El análisis de una variación puntual requiere de cálculos más elaborados de los parámetros dentro del dominio para obtener la solución final al problema. Una aplicación para el concepto de volumen de control muy común es aquella en la que se hace un análisis de la descarga de aguas residuales utilizando un volumen de control; desde el punto de vista de regulación, se deseara analizar como están distribuidas las partículas de contaminante a lo largo del borde en todos los puntos de la orilla del río, sin embargo el análisis del volumen de control únicamente servirá para predecir los valores promedio de concentración en las superficies de control a la entrada y a la salida; es más, únicamente se puede calcular la concentración promedio de contaminante dentro del volumen de control, la variación punto a punto no puede calcularse. Un enfoque de campo es necesario para calcular la variación punto a punto de la variable del flujo sobre todo el rango del dominio. En este enfoque se realiza un análisis que consiste de un estudio del dominio de un número grande de volúmenes de control o sistemas, de tal manera que cuando tiendan a cero formen un sistema no lineal de ecuaciones diferenciales parciales.

Las ecuaciones que se obtienen son de un nivel muy alto, es decir, son tan difíciles de resolver que una solución general de la distribución tridimensional de variables relevantes para los tipos de geometrías complejas, encontrados con la práctica, todavía no se ha logrado.

Toda la dinámica de fluidos y el transporte asociado varían esencialmente de punto a punto en todo el dominio espacial y de un momento a otro. Estas variaciones pueden ser especialmente rápidas en las escalas de variabilidad más pequeñas (por encima de la escala molecular), siendo aproximadamente 0.1 segundo y 0.1cm. Por consiguiente, el mayor interés está en describir en forma precisa todos los posibles tipos de procesos físicos que causan esta variabilidad, así como en identificar procesos válidos para simplificar la complejidad matemática sin alterar los procesos físicos dominantes.

2.2 Tipos de flujo

El flujo de un fluido puede clasificarse de muchas formas: turbulento contra laminar; real contra ideal; reversible contra irreversible; permanente contra no permanente; uniforme contra no uniforme; rotacional contra irrotacional.

2.2.1. Flujo turbulento

El movimiento en un *flujo turbulento* es en trayectorias arremolinadas y de forma muy irregular. En este movimiento irregular del flujo se causan intercambios de momentum, es decir, que el choque de capas de fluido desde una porción a otra provoca la transferencia de momentum entre ellas. Un análisis molecular del fluido es similar a uno a mayor escala.

Debido a la irregularidad del flujo turbulento, los remolinos turbulentos cambian continuamente su tamaño desde muy pequeños hasta muy grandes. En un flujo turbulento se producen muchas pérdidas por la fricción, se producen mayores esfuerzos cortantes a través del fluido. Como un estimado, se sabe que en un flujo turbulento las pérdidas varían con una potencia que oscila entre 1.7 y 2 % de la velocidad, en un flujo laminar éstas varían con la primera potencia de la velocidad.

2.2.2. Flujo ideal

La fricción en un *fluido ideal* no está presente, este fluido no es compresible, y aunque puede no debe confundirse con un gas perfecto. Un fluido ideal es solamente una suposición que debe utilizarse solamente cuando se están analizando grandes cantidades de flujo. Un fluido viscoso presenta mucha fricción, por lo tanto un flujo ideal es no viscoso y sus procesos de flujo son reversibles y libres de pérdidas.

A la capa de fluido que se encuentra cercana a la vecindad inmediata a una frontera real del flujo, y a la cual su velocidad relativa a la frontera se ve afectada por esfuerzos cortantes viscosos, se le conoce como la capa límite. Estas capas límites pueden ser laminares o turbulentas, dependiendo generalmente de su longitud, viscosidad, velocidad del flujo cerca de ellas y de la rugosidad de la frontera.

2.2.3. Flujo rotacional

Estudiando la rotación de una partícula de fluido alrededor de un eje dado, esta rotación se define como la velocidad angular promedio de dos elementos lineales infinitesimales en la partícula, que originalmente se encuentran haciendo ángulo recto el uno con respecto al otro y con relación al eje dado. Si las partículas de fluido dentro de una región tienen rotación alrededor de cualquier eje el flujo se conoce como *flujo rotacional*, o como flujo vórtice.

Cuando no existe rotación en el fluido este se conoce como flujo irrotacional. Si un fluido se encuentra en reposo y no tiene fricción, cualquier movimiento subsiguiente de este fluido también será irrotacional. Los esfuerzos cortantes provocados por la presencia de las fronteras sólidas así como los gradientes de densidad y otras condiciones harán que en el fluido se presente una rotación. Cuando en un flujo de un fluido no existe transferencia de calor desde o hacia éste, se dice que es un *flujo adiabático*. El *flujo adiabático reversible* (adiabático sin fricción) se conoce como flujo isentrópico. Aquel flujo en el cual las condiciones en cualquier punto permanecen constantes en el tiempo se denomina *flujo permanente*. En un flujo permanente no existe cambio en la densidad ρ , en la presión p , en la temperatura T o en la concentración C .

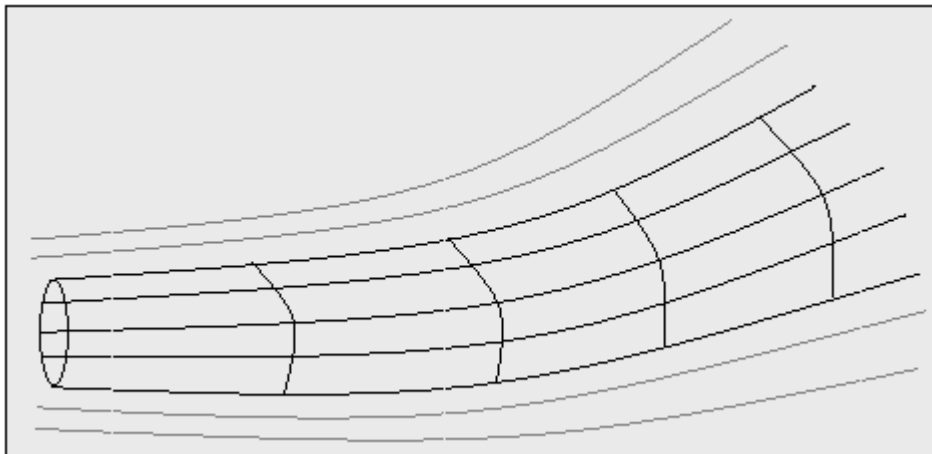
2.3. Líneas de tubos de corriente

La velocidad en un punto de un flujo estacionario dado es constante en el tiempo (4-403). Consideremos un punto en el interior de un fluido, debido a que la velocidad del flujo y la posición del punto no cambian con el tiempo, toda partícula que llegue a este punto pasará por ahí con la misma rapidez y dirección. Lo mismo se puede decir con relación a otros puntos por los que pasa el fluido; por lo tanto si trazamos la trayectoria de la partícula, esta curva indicará la trayectoria seguida por toda partícula que llegue al punto elegido. La línea que se va trazando se llama línea de corriente. Una línea de corriente es paralela a la velocidad de las partículas del fluido en cualquier punto. Dos líneas de corriente en un flujo estacionario no pueden cruzarse porque si lo hicieran una partícula de fluido que llegase podría seguir por cualquiera de los dos caminos que se le presentan y el flujo no sería estacionario. En el flujo estacionario, la distribución de las líneas de corriente de flujo es constante en el tiempo.

Por cuestiones de análisis se puede suponer una sola línea de corriente, la cual pasa por cualquier punto del fluido; pero en un fluido siempre hay una gran cantidad de líneas de corriente.

Al agrupar en un flujo estacionario un número finito de líneas de corriente se forma un haz, la región tubular que se ha formado entonces se llama *un tubo de flujo*. Otras líneas de corriente forman los límites de dicho tubo, los cuales siempre son paralelos a la velocidad de las partículas del fluido. El tubo de corriente del fluido se comporta como una tubería debido a que el fluido puede no cruzar el borde de un tubo de flujo, el fluido que entra por un extremo debe salir por el otro.

Figura 5. Líneas de tubos de corriente



Fuente: Robert Resnick; David Halliday. Física parte 1. Pág. 401

2.4. Conservación de la masa: ecuación de continuidad

Si consideramos un tubo de flujo angosto (4-401), la velocidad del flujo en su interior, aunque es paralela al tubo en cualquier punto, puede tener diferentes magnitudes en puntos distintos. V_1 es la rapidez de las partículas en el fluido en un punto P cualquiera y V_2 la de las partículas del fluido en otro punto, digamos Q, estas variables se pueden observar en la figura 6.

Las áreas transversales de los tubos perpendiculares a los puntos P y Q en las líneas de corriente son A_1 y A_2 respectivamente.

En un intervalo de tiempo Δt definido, cualquier elemento de fluido recorre aproximadamente la distancia de $v\Delta t$. Con esto podemos saber que la masa Δm_1 del fluido que cruza A_1 en el intervalo de tiempo Δt aproximadamente es:

$$\Delta m_1 = \rho_1 A_1 V_1 \Delta t \quad (\text{Ecuación 2.1.})$$

así mismo podemos saber que el flujo de masa $\Delta m_1/\Delta t$ es aproximadamente $\rho_1 A_1 V_1$. Al hacer que Δt tenga un valor bastante pequeño en este intervalo de tiempo de tal forma que los valores del área y la velocidad no varíen apreciablemente en la distancia que recorre el fluido, podemos obtener estas definiciones precisas:

$$\begin{aligned} \text{flujo de la masa en P} &= \rho_1 A_1 V_1 \quad \text{y} \\ \text{flujo de la masa en Q} &= \rho_2 A_2 V_2 \\ &(\text{Ecuación 2.2.}) \end{aligned}$$

La masa que cruza cada sección del tubo en un intervalo de tiempo siempre debe ser la misma debido a que éste no puede cruzar las paredes del tubo y como no hay ni “fuentes” ni “sumideros” donde fuese creado o destruido en el interior del tubo. En particular, el flujo de la masa en P debe ser igual al flujo de la masa en Q:

$$\begin{aligned} \rho_1 A_1 V_1 &= \rho_2 A_2 V_2 \\ \text{ó} \quad \rho A V & \end{aligned}$$

$$(\text{Ecuación 2.3.})$$

Esta última ecuación expresa la ley de la *conservación de la masa* en la dinámica de fluidos. Debido a la existencia de flujos no estacionarios, rotacionales, compresibles, etc., en el caso de que existan fuentes y sumideros esta ecuación puede aplicarse en el caso más general, además, aquellos en los que la densidad varía tanto con el tiempo como con la posición, todavía debe haber conservación de la masa y se puede escribir una ecuación de continuidad que exprese este hecho, la ecuación es la 2.4.:

$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} + \frac{\partial\rho}{\partial t} = S$$

(Ecuación 2.4.)

Los componentes de la velocidad del fluido se pueden ver en la ecuación 2.4, estos componentes varían con el tiempo y con la posición, la densidad ρ también varía. Considerando un elemento de volumen pequeño en un fluido, al que aplicamos esta última ecuación, se pueden demostrar varios hechos (4-402):

- Al sumar los primeros tres términos de la ecuación se determina el flujo de la masa saliente por unidad de volumen del elemento de volumen.
- Con el cuarto término se determina el ritmo por unidad de volumen con el que se acumula la masa en el elemento de volumen.
- El término S establece la tasa por unidad de volumen con la que penetra la masa al elemento de volumen desde una fuente, es decir, cuando S es positiva, o con el que desaparece la masa del elemento de volumen hacia un “sumidero”, es decir, cuando S es negativa.

La interpretación de estos tres párrafos demuestra que la última ecuación es un enunciado de la conservación de la masa para el flujo de un fluido.

Como el producto AV permanece constante a lo largo de un tubo de flujo, esto nos hace suponer o visualizar una imagen que las líneas de corriente presentan en un tubo de corriente, las cuales deben agruparse más estrechamente que en la parte ancha.

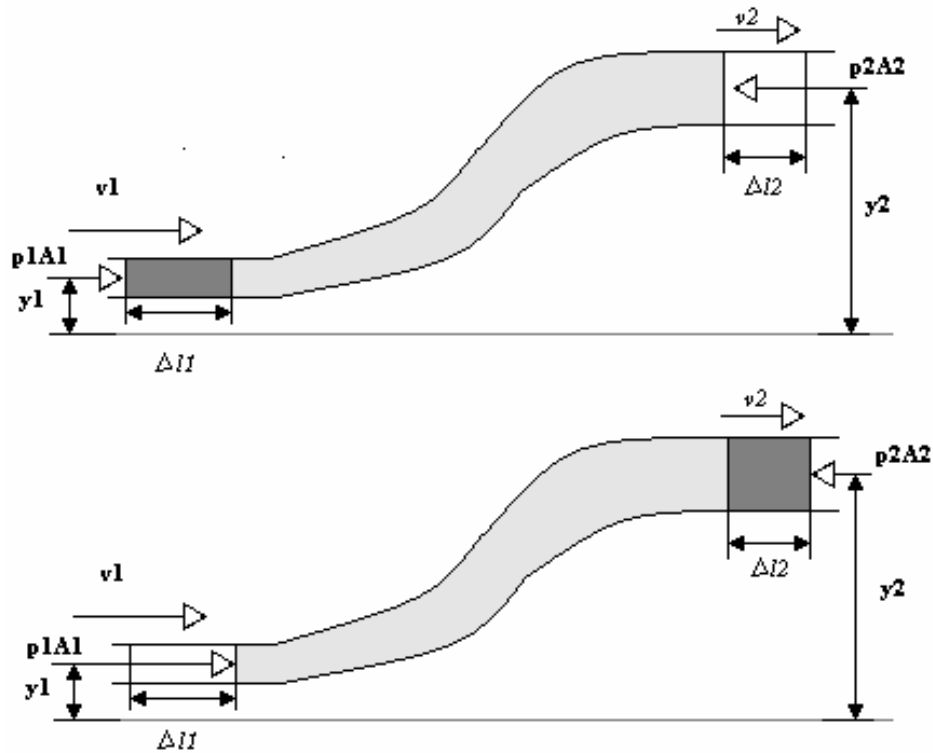
Si la distancia entre las líneas de corriente decrece, la rapidez del fluido debe aumentar, entonces podemos llegar a la conclusión de que las líneas que se encuentran distanciadas indican regiones de rapidez baja y las líneas de corriente concentradas indican regiones de gran rapidez.

2.5. La ecuación de Bernoulli

Se puede decir que la ecuación de Bernoulli es una relación fundamental de la mecánica de los fluidos. Esta ecuación no es un nuevo principio, sino que puede deducirse de las leyes básicas de la mecánica newtoniana. Es conveniente obtenerlo del teorema de la variación de la energía porque, en esencia, es una aplicación de este teorema de movimiento de los fluidos (4-403).

Es necesario suponer un flujo no viscoso para deducir la ecuación de Bernoulli, además debe suponerse que es estacionario e incompresible (por ejemplo agua), que se desplaza a lo largo de un conducto o de la línea de flujo, como lo muestra la figura 6:

Figura 6. Desplazamiento de un flujo no viscoso en agua.



Fuente: Robert Resnick; David Halliday. Física parte 1 Pág. 403

La sección transversal de la tubería tiene un área A_1 en la parte de la izquierda. La altura a la que se encuentra el fluido en este punto es y_1 sobre un nivel de referencia dado. La tubería se va ensanchando y subiendo a la vez hasta que vuelve a adquirir un área uniforme nuevamente, esta área es A_2 , la altura ahora es y_2 . Nos referiremos como “sistema” a la porción de fluido entre A_1 y A_2 . La porción de fluido que tiene un color gris mas intenso se ha transportado desde el inicio en el primer esquema de la figura 6 hasta el final de la tubería, como en el segundo esquema de la misma figura. En los puntos de la parte angosta de la tubería, la presión es p_1 y la rapidez es v_1 ; en todos los puntos de la porción ancha, la presión es p_2 y la rapidez es v_2 .

La fuerza resultante que actúa desplazando el sistema ha efectuado un trabajo, éste es igual al cambio de la energía cinética del sistema, el teorema de la variación de energía explica este hecho. Debido a la viscosidad de un fluido se crean fuerzas de fricción en una tubería, si dichas fuerzas debidas a la viscosidad se pueden despreciar en la tubería de las figuras anteriores tendremos que las únicas fuerzas que producen trabajo sobre el sistema son las fuerzas de presión p_1A_1 y p_2A_2 , las cuales actúan en los extremos izquierdo y derecho respectivamente; además se tienen las fuerzas del sistema y la fuerza de gravedad. Con el desplazamiento del fluido a través de la tubería, una cantidad de fluido tiende a elevarse, ésta se representa con la porción con color gris mas intenso. La cantidad de fluido representada por la parte con color gris claro, no varía con el flujo.

La fuerza resultante efectuará un trabajo W sobre el sistema, la forma de encontrar este trabajo es la siguiente:

1. La fuerza de presión p_1A_1 efectuará un trabajo sobre el sistema, el cual es igual a $p_1A_1\Delta l_1$.
2. De igual manera, la fuerza de presión p_2A_2 ejercerá sobre el sistema un trabajo que es igual a $-p_2A_2\Delta l_2$.

En este último resultado se puede ver un signo negativo, lo cual quiere decir que el sistema efectúa un trabajo positivo.

3. La elevación del fluido hace que la fuerza de gravedad también efectúe trabajo sobre el sistema, la elevación de la porción con color gris intenso se muestra en la figura 6, la cual se da desde la altura y_1 hasta la altura y_2 y su valor es $-mg(y_2-y_1)$, en esta expresión m es la masa del fluido en ambas áreas sombreadas. El signo negativo indica que el sistema ha efectuado trabajo en contra de la fuerza gravitacional.

La suma de los trabajos ejercidos por las fuerzas de presión y el trabajo de la fuerza de gravedad proporciona el trabajo W realizado sobre el sistema por la fuerza resultante:

$$W = p_1 A_1 \Delta l_1 - p_2 A_2 \Delta l_2 - mg(y_2 - y_1)$$

(Ecuación 2.5.)

El volumen del elemento de fluido que hemos estado tratando es $A_1 \Delta l_1$ o $A_2 \Delta l_2$, y puede representarse como m/ρ , donde m es la masa y ρ es la densidad, la cual es constante. Los dos elementos de fluido tienen la misma masa, de modo que al hacer $A_1 \Delta l_1 = A_2 \Delta l_2$ se supone que el fluido no es compresible.

El cambio de energía cinética en el elemento de fluido es

$$\Delta K = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

(Ecuación 2.6.)

Por el teorema de la variación de la energía tenemos

$$W = (p_1 - p_2)(m/\rho) - mg(y_2 - y_1)$$

es decir

$$W = \Delta K$$

$$(p_1 - p_2)(m/\rho) - mg(y_2 - y_1) = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

simplificando y reordenando la última expresión obtenemos la ecuación 2.7.:

$$(p_1 - p_2)(m/\rho) - mg(y_2 - y_1) = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 + Q$$

(Ecuación 2.7.)

Como los subíndices 1 y 2 se refieren a cualquiera de los dos lugares en la tubería se pueden suprimir y escribir lo siguiente:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2$$

Esta última ecuación es la ecuación de Bernoulli para un flujo estacionario, no viscoso e incompresible.

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y = \text{constante}$$

(Ecuación 2.8.)

La ecuación de Bernoulli se aplica estrictamente solo al flujo estacionario, ya que las cantidades que intervienen en ella están evaluadas a lo largo de una línea de corriente. En la figura 6, la línea de corriente está a lo largo del eje de la tubería. Sin embargo, si el flujo es irrotacional, se puede demostrar que la constante de la última ecuación es la misma para todas las líneas de corriente.

La temperatura de un fluido no viscoso e incompresible no puede cambiarse por medios mecánicos. Por lo tanto, la ecuación de Bernoulli, tal como la establecimos, se refiere a un proceso isotérmico, es decir, a temperatura constante. Sin embargo, la temperatura de un fluido no viscoso, pero compresible, puede cambiarse por medios mecánicos.

La ecuación 2.8 puede generalizarse para que incluya a un fluido compresible, añadiendo un término u en el lado izquierdo de la ecuación, el cual represente a la *energía interna* por unidad de volumen del fluido. Este término (y también la presión p) tendrá valores dependientes de la temperatura.

Cuando se trata de un flujo viscoso, sobre el fluido actúan fuerzas friccionales, de tal manera que parte del trabajo realizado en éste aparece como energía calorífica, entonces Q representa a la energía calorífica generada en el flujo viscoso desde el punto 1 hasta el 2. Según esto, la ecuación de Bernoulli puede modificarse mediante el uso de correcciones empíricas para la conversión de la energía mecánica en energía calorífica. Sin embargo, si la tubería o conducto es liso y su diámetro es grande comparado con su longitud, y si el flujo es lento y la viscosidad es pequeña, la energía calorífica generada es despreciable.

Igual que la estática de una partícula es un caso especial de la dinámica de la partícula, podemos decir que la estática de los fluidos es un caso especial de la dinámica de los fluidos.

Por lo tanto, no resulta sorprendente encontrar que la ley del cambio de la presión con la altura en un fluido en reposo está incluida, como un caso especial, en la ecuación de Bernoulli. Si el fluido está en reposo, resulta que las velocidades son iguales a cero, por lo tanto:

$$p_1 + \rho g y_1 = p_2 + \rho g y_2$$

Esta última ecuación puede expresarse como una diferencia de presiones

$$p_2 - p_1 = -\rho g(y_2 - y_1)$$

(Ecuación 2.9.)

En la ecuación de Bernoulli todos los términos tienen dimensiones de presión (4-405). La presión $p + \rho gh$, presente, aun sin flujo ($v = 0$), recibe el nombre de *presión estática*; el término $\frac{1}{2} \rho v^2$ recibe el nombre de *presión dinámica*.

3. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

En este se hace una descripción general sobre las centrales hidroeléctricas, es decir, los componentes más importantes de una central hidroeléctrica, su funcionamiento, los tipos de centrales hidroeléctricas, etc. En el próximo capítulo se describen las centrales hidroeléctricas de bombeo, las cuales son el objetivo de nuestro diseño.

3.1 Descripción general del funcionamiento de una central hidroeléctrica

Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía mecánica que proporciona el desplazamiento del agua para generar energía eléctrica, la contaminación que se genera en las centrales hidroeléctricas es relativamente baja. La energía potencial de un objeto es mayor cuando se encuentra a una altura mayor, por ello para caídas de agua bastante grandes se puede generar cantidades grandes de energía eléctrica.

3.1.1. Elementos que conforman una central hidroeléctrica

Básicamente los elementos que conforman una central hidroeléctrica son los siguientes:

- 1. Represa:** Este elemento hace que se cree una diferencia de niveles en el río, con lo cual la energía cinética del agua aumenta significativamente y puede ser aprovechada para la generación de energía eléctrica cuando es transformada por los generadores eléctricos.

2. Tuberías de conducción: Por lo general la represa de una central hidroeléctrica se encuentra a una altura muy superior a la de la casa de máquinas y puede localizarse también a varios cientos de metros de distancia de la misma, con lo cual se tiene la necesidad de transportar el agua por medio de tuberías adecuadas que resistan las presiones que se generan por la caída de agua.

3. Casa de máquinas: En la casa de máquinas se encuentra el corazón de las centrales hidroeléctricas, ya que aquí encontramos todos los sistemas de medición, de regulación, de control, pero principalmente encontramos las turbinas que son los elementos receptores de la energía cinética que proporciona el agua.

4. Desembocadura: Luego de que el agua ha entregado su energía cinética, entonces es devuelta al río para que siga su camino, la desembocadura es el lugar donde el agua puede volver al río. Esta parte del diseño de la central hidroeléctrica es importante debido a que el agua no debe regresar hacia la turbina porque podría variar su velocidad, entonces la cámara donde se encuentra la turbina debe ser capaz de ir desocupando el agua para que la turbina funcione adecuadamente.

3.1.2. Tipos de turbinas utilizadas en hidroeléctricas

Las turbinas hidráulicas se clasifican de acuerdo a la altura de caída de agua. Existen básicamente dos tipos de turbinas hidráulicas: las de impulso y las de reacción, se mencionan las siguientes tres que se encuentran entre estos tipos.

- i. Turbina Pelton**
- ii. Turbina Francis**
- iii. Turbina Kaplan**

3.1.2.1. Características y aplicaciones de cada tipo de turbina

Las turbinas hidráulicas pueden ser de cualquiera de las siguientes dos clases:

- 1. Turbinas de impulso:** Para las turbinas de impulso tenemos que el agua que entra por las boquillas de inyección se inyecta directamente a una serie de paletas o alabes localizados en la periferia de la rueda, de manera que la energía de la presión del agua se convierte totalmente en energía cinética. La mayoría de las turbinas de impulso son de eje horizontal y se utilizan en grandes alturas. La turbina Pelton es de este tipo.
- 2. Turbinas de reacción:** El funcionamiento de las turbinas de reacción es distinto, en ellas el agua entra alrededor de toda la periferia de la rueda polar, permaneciendo ésta todo el tiempo llena de agua. El agua que actúa sobre la rueda se encuentra a una presión mayor que la atmosférica. Las turbinas de reacción pueden ser de eje horizontal o vertical, correspondiendo este último caso a los de mayor potencia. Por lo general se usan para caídas de agua medias y bajas. Dentro de las turbinas de reacción se tienen a las turbinas Francis, Kaplan de impulsor.

3.1.2.2 Selección de turbinas para generación de energía

Una turbina hidráulica se selección tomando en cuenta varios factores, a continuación numeramos los criterios de selección.

1. Por la caída de agua

- I. Turbinas de gran caída (gran altura)
- II. Turbinas de media caída
- III. Turbinas de baja caída

Para los diferentes tipos de turbinas se tienen como una idea de aplicación los datos siguientes:

Tabla I. Clasificación de turbinas de acuerdo a la altura de la caída de agua.

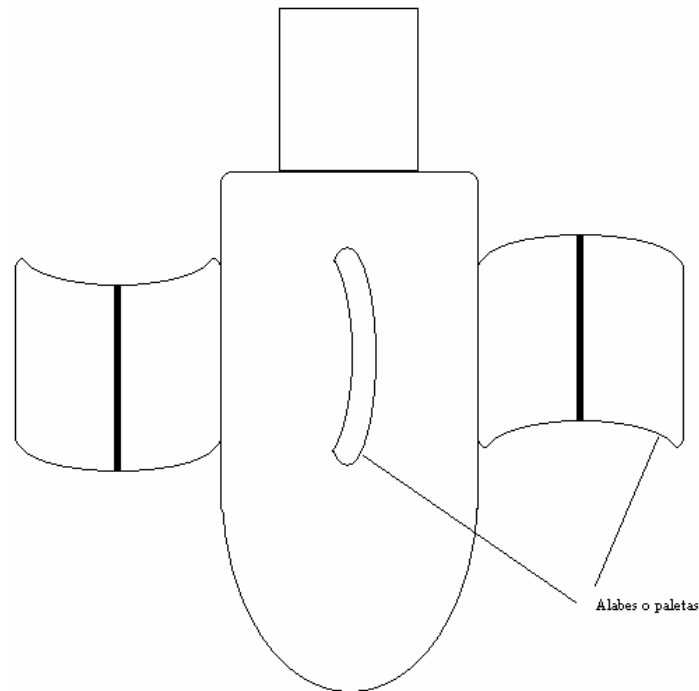
TURBINA	CAIDA
PELTON.	300 a 900 m
FRANCIS.	35 a 300 m
KAPLAN.	Hasta 35 m

Fuente: Joseph B. Franzini; E. John Finnemore. Mecánica de Fluidos con aplicaciones en Ingeniería. Pág. 458.

Para la selección del tipo de turbina a usar en un aprovechamiento hidroeléctrico se deben considerar los siguientes factores:

- Altura de trabajo (Tipo de caída)
- Naturaleza de la carga
- Potencia de salida
- Velocidad específica

Figura 7. Turbina Kaplan



3.1.3 Funcionamiento y requerimientos de una hidroeléctrica

Una central hidroeléctrica utiliza la energía potencial del agua cuando se crea una diferencia de alturas artificialmente por medio de una represa. La finalidad de la represa es crear la diferencia de alturas y también almacenar el agua ya que en las épocas secas del año no puede detenerse el proceso de generación. En las épocas de mucha lluvia sucede lo contrario, se debe contar con aliviaderos en la represa para evitar inundaciones en las áreas cercanas. El agua es guiada hacia las turbinas por medio de tuberías, las cuales pueden ser metálicas o plásticas, la elección del material depende de la presión generada por el agua. Cuando se utilizan tuberías de plástico deben de enterrarse, en cambio si se utilizan tuberías de metal se pueden montar sobre bases.

Con respecto al proceso de generación, se utiliza un generador trifásico de energía, el cual requiere de una fuente de excitación en su campo, la cual puede ser un banco de baterías o una máquina de corriente directa dependiendo de la potencia del generador. Se requiere de un sistema de medición y protección, el cual se implementa con un grupo de transformadores de corriente y de potencial.

Las turbinas y generadores de una central hidroeléctricas están dimensionadas para operar con ciertas cantidades de flujo, presiones, etc., es por ello que existen muchos sistemas de monitoreo para todas las variables del proceso. Se pueden implementar también medidores de flujo y de presión, siempre que estos soporten las presiones generadas en las tuberías.

3.2. Tipos de hidroeléctricas

Desde sus inicios, al igual que cualquier otro sistema, las centrales hidroeléctricas han ido evolucionando, es decir, se han ido adaptando a las necesidades de cada población y la vez a las condiciones geográficas que permiten su desarrollo.

El agua se considera desde el punto de vista de la electricidad, como la más barata fuente de potencia, y ha servido a la civilización desde los primeros días por medio de las ruedas hidráulicas. En general el principio de un aprovechamiento hidroeléctrico es convertir la energía de posición o potencial que tiene el agua en energía eléctrica y con un mínimo de pérdidas. Para esto se conduce el agua hacia las turbinas procurando que las pérdidas en la conducción sean mínimas. El agua al llegar a las turbinas produce energía mecánica, ésta a su vez se transforma en energía eléctrica al acoplarse a un generador eléctrico. Los elementos principales que constituyen una central hidráulica; son los siguientes:

1. Depósitos de agua

Estos son los elementos básicos de una central hidroeléctrica, se usan para almacenar el agua que puede ser utilizada para accionar las turbinas que producen potencia eléctrica en los generadores. El almacenamiento debe ser natural de preferencia, como es el caso de los lagos, los almacenamientos artificiales se pueden lograr mediante la construcción de cortinas para presas. Si los depósitos o almacenamientos de agua son grandes se puede generar energía de una forma constante, es decir, sin interrupciones debidas a escasez del agua, por ejemplo en épocas secas del año.

2. Represas

Se debe construir una estructura que impida el paso del agua para obtener una diferencia de alturas, una represa es una estructura de concreto o de cualquier otro material que se construyen en un lugar adecuado sobre la trayectoria de los ríos, la función primaria de una represa es almacenar y dar altura al agua. El diseño de la represa debe ser económico y confiable. Una represa debe de ser una estructura robusta debido a que las presiones que soporta son de niveles muy altos.

3. Tuberías para conducción del agua

El conducto de agua o tubería de conducción se usa para transportar el agua desde el almacenamiento hasta las turbinas en la llamada casa de máquinas. El sistema de conducción de agua incluye también válvulas de admisión, compuertas y en general el sistema de control de flujo del agua.

4. La casa de máquinas y el equipo

En la casa de máquinas se encuentra todo el equipo de medición, de monitoreo, y también el más importante del sistema de generación, y es donde se realiza la conversión de la energía cinética del agua en potencia mecánica y por último es transformada por los generadores a potencia eléctrica.

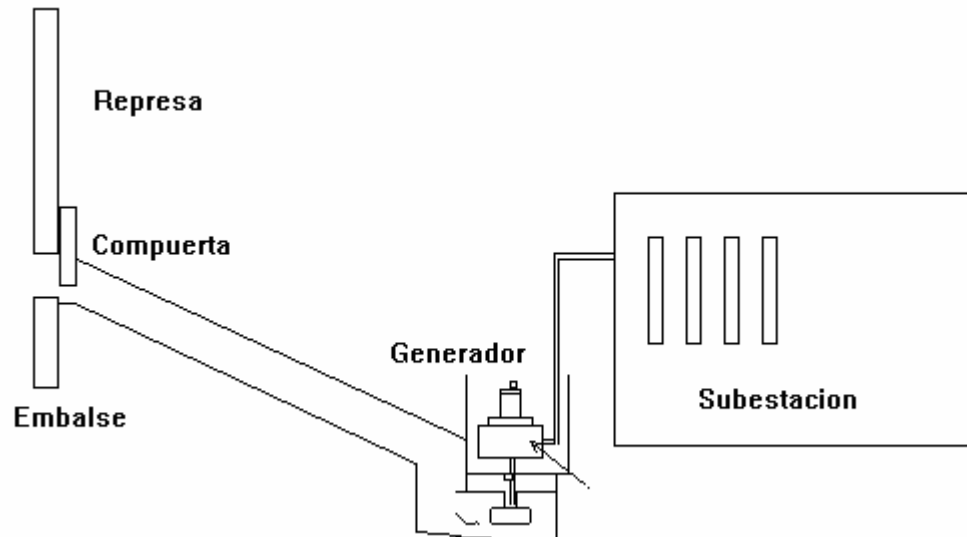
- Turbinas
- Generadores eléctricos
- Válvulas
- Equipo de medición de flujo
- Transformadores eléctricos
- Tableros e instrumentos
- Interruptores
- Sala de baterías

El arreglo o disposición en la casa de máquinas debe ser de tal forma que proporcione suficiente espacio alrededor de algunos equipos como turbinas, generadores, gobernadores, válvulas, bombas, etc., para facilitar de esta manera su montaje, desmantelamiento y reparación.

5. Canal de descarga

El canal de descarga es un conducto para transportar el agua descargada de la turbina al río, el agua después de accionar la turbina pasa a través del canal de desfogue hacia el canal de descarga.

Figura 8. Central hidroeléctrica.



3.2.1. Centrales hidroeléctricas a “filo de agua”

A este tipo de centrales hidroeléctricas se les llama así porque el agua del cual se obtiene la energía mecánica no es controlada de ninguna forma, no se controla la cantidad que pasa por las turbinas. Se presenta cierta desventaja con este tipo de hidroeléctrica en las estaciones del año en las que el afluente de río es bajo.

3.2.2 Centrales hidroeléctricas con embalse de reserva

Al contrario del tipo anterior, en éste sí se tiene un control de la cantidad del agua que corre por las turbinas. Las centrales hidroeléctricas con embalse de reserva requieren de un gran diseño de ingeniería, ya que además de modificar la geografía del lugar donde funcionará deben implementarse sistemas mecánicos, de control, así como sistemas que prevengan posibles inundaciones a las áreas cercanas.

3.2.3 Centrales hidroeléctricas de bombeo

Una central hidroeléctrica de bombeo es aplicable a aquellas zonas geográficas en las que el recurso del líquido es limitado, ya que el mismo es reutilizado para obtener su energía mecánica. La energía eléctrica generada es utilizada en parte por las bombas que envían de nuevo el agua hacia un embalse colocado en la parte superior de la central hidroeléctrica.

4. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE BOMBEO

Se tomó la decisión de dedicar un a la descripción de las centrales eléctricas de bombeo debido a que el proyecto que se está elaborando ha tomado como base de funcionamiento este tipo de centrales hidroeléctricas.

4.1. Ventajas que presenta una central hidroeléctrica de bombeo

Cada tipo de central hidroeléctrica presenta sus ventajas, en el caso de las centrales hidroeléctricas de bombeo la más significativa es que el líquido que se utiliza para generar la potencia mecánica que mueve las turbinas es retornado a un embalse principal para poder ser utilizado nuevamente.

Como en cualquier tipo de hidroeléctrica, las de bombeo también presentan un nivel bajo de contaminación, ya que el agua solamente pasa por las turbinas proporcionando su energía cinética y luego se almacena para ser bombeada de nuevo.

4.2. Elementos que conforman el sistema

Al igual que las centrales hidroeléctricas en las que no se reutiliza el agua, éste tipo de centrales hidroeléctricas, utiliza elementos para regulación del flujo del agua, en este caso se utilizan tuberías para conducir el líquido con válvulas de algún tipo. Cuando un generador debe pararse por reparaciones o por mantenimiento es necesario que el flujo de agua se detenga, es por ello que se requiere de algún mecanismo para regularlo.

Las centrales hidroeléctricas de bombeo cuentan con dos embalses de agua situados a distintas alturas, uno de ellos para crear dicha diferencia de alturas y el otro para retener el agua ya utilizada. De manera general se puede decir que una central hidroeléctrica de bombeo está compuesta por los siguientes elementos:

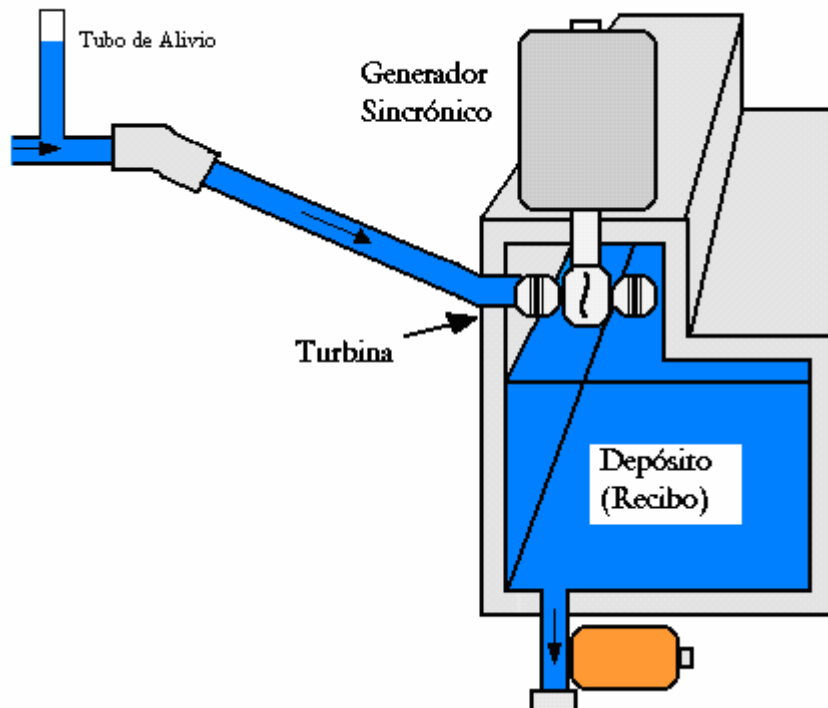
1. Embalse superior

Este embalse sirve, como se mencionó antes, para crear una diferencia de alturas en el río. En esta estructura podemos encontrar las compuertas, vertederos, etc., los cuales son dispositivos utilizados para regular el flujo y el nivel del agua. El nivel del embalse debe de ser controlado continuamente.

2. Tuberías de conducción

Son las encargadas de guiar el agua hasta la turbina, punto donde la misma entrega su energía cinética y se convierte en mecánica. Las tuberías deben ser seleccionadas para que soporten la presión generada por el agua. Cercano al área donde se encuentra la turbina se encuentra un tubo de alivio en la tubería, éste es utilizado para evitar el golpe de ariete en la turbina cuando se encuentra detenida y también, en el caso de las válvulas, para no dañarlas. La presión generada por el agua en este diseño no es muy alta, entonces puede controlarse por una válvula dimensionada adecuadamente.

Figura 9. Embalse inferior y tubo de alivio.



3. Turbina hidráulica

Puede ser del tipo Pelton, Francis y Kaplan. Es el elemento que provee de energía mecánica al generador eléctrico para que pueda funcionar. La selección de la turbina hidráulica se lleva a cabo estudiando el comportamiento de los diferentes tipos de acuerdo a la caída de agua (1-441).

4. Generador

En conjunto con la turbina hidráulica es la base del sistema de generación, se debe seleccionar de acuerdo a la potencia de entrada que recibe por parte de la turbina.

Por lo regular para la generación de energía eléctrica se utilizan generadores sincrónicos, ya que la frecuencia de la señal está en sincronía con la velocidad mecánica del generador, además se requiere de una fuente de corriente directa para que el generador eléctrico pueda funcionar.

5. Casa de máquinas

En la casa de máquinas se encuentra el generador, la turbina hidráulica, los sistemas de medición y protección, etc. Su estructura es muy importante debido a todos los equipos que en ella se encuentran. En la parte inferior de la casa de máquinas se construyen estructuras adecuadas para instalar las turbinas y luego de utilizar el agua, ésta pueda ser enviada al embalse inferior desde donde puede ser bombeada hacia el embalse superior.

6. Embalse inferior

En una central hidroeléctrica convencional no se tiene un embalse inferior ya que el agua sigue su camino en el río o hacia el mar. Para una central hidroeléctrica de bombeo se requiere un embalse para retener el agua que ya ha sido utilizada. En este embalse se sitúa la o las bombas para retornar el agua al embalse superior.

7. Sistema de bombeo

La capacidad del sistema de bombeo depende del volumen del agua que se esté manejando, también se debe tomar en cuenta la diferencia de altura que se crea entre los dos embalses. En nuestro diseño ya se cuenta con una bomba de agua que es la encargada del llenado del depósito utilizado como embalse superior.

4.3. Factores importantes en el diseño

Los factores que influyen en el diseño de una central hidroeléctrica de bombeo son:

- **El área geográfica donde está situada**

A diferencia de una central hidroeléctrica convencional, este tipo de centrales hidroeléctricas requieren de una estructura extra, el embalse o depósito de agua utilizada por la o las turbinas, lo cual en algunas áreas geográficas podría ser difícil llevar a cabo.

- **Recursos acuíferos limitados**

No importando si los recursos acuíferos son limitados, la implementación de una central hidroeléctrica de bombeo puede ser llevada a cabo ya que los recursos se estarían manejando de una manera moderada. Las limitantes en estos tipos de hidroeléctricas son los costos que implican los sistemas de bombeo y la construcción de dos embalses.

- **Utilización posterior del agua**

La utilización posterior del agua cuando ya ha entregado su energía mecánica se debe tomar en cuenta, se debe considerar si el agua será bombeada totalmente hacia el embalse superior o solamente una parte. En nuestro diseño no toda el agua será bombeada hacia el embalse superior, en determinadas horas la generación se detendrá y el agua deberá ser distribuida para el consumo de la población.

- **Beneficios a las poblaciones cercanas**

Las poblaciones cercanas pueden beneficiarse con la generación de energía eléctrica a un bajo costo, y las estructuras pueden ser ornamentales o utilizadas para riego en las cosechas.

5. DISEÑO DEL PROYECTO

Este agrupa los cálculos y características del diseño que se está elaborando para la central hidroeléctrica de bombeo en la Antigua Guatemala.

5.1 El proyecto: Hidroeléctrica de bombeo para la Antigua Guatemala

Los siguientes párrafos están dedicados a la descripción de las características del proyecto así como los beneficios que traerá consigo el mismo.

5.1.1 Características del proyecto

El diseño de una central hidroeléctrica de bombeo es el fruto de la búsqueda de fuentes de energía renovables, y que mejor manera de hacerlo que reciclando el vital líquido. Las centrales hidroeléctricas de bombeo reutilizan el agua que pasa por las turbinas en repetidas veces, en éstas el agua es retenida en un embalse luego de que ha entregado su energía cinética y es bombeada al embalse de mayor altura. En este proyecto, el agua que será bombeada hacia el embalse superior proviene de un nacimiento y es almacenada en un pozo de 152 metros de profundidad situado a una distancia de aproximadamente 50 metros del embalse (depósito) principal, éste último se sitúa en el Cerro de la Cruz en la Antigua Guatemala a una altura aproximada de 25 m. Las medidas del depósito que servirá como embalse principal son:

Tabla II. Medidas del depósito Cerro de la Cruz, la Antigua G.

Medidas del depósito 1
Alto: 1.92 m
Largo: 28 m
Ancho: 12 m

Fuente: Municipalidad de la Antigua Guatemala

El espesor de las paredes del depósito es de 20 cm. Al restar los 20 cm. a las medidas del depósito obtenemos un volumen de líquido de 550.65 metros cúbicos. El volumen del pozo que será utilizado como depósito del agua que ya ha entregado su energía cinética es de 230 litros.

Se generará energía en baja tensión (menos de 600V); se utilizará un generador sincrónico, el cual requiere una fuente de corriente directa para el sistema de excitación.

5.1.2. Beneficios de la hidroeléctrica de bombeo

El proyecto que se está diseñando trae varios beneficios, aunque son a pequeña escala, los cuales pueden ser de ayuda para la comunidad:

1. La contaminación que se produce en general en cualquier tipo de central hidroeléctrica tiene un nivel muy bajo. El agua utilizada para suministro de la Antigua Guatemala no sufrirá contaminación alguna, el agua en su totalidad podrá ser utilizada luego de pasar por la turbina.
2. El costo inicial del equipo se cubre con la generación de energía a un bajo costo, el mantenimiento es sencillo.
3. En las horas del día en las que el consumo de agua de la población sea bajo, se puede generar la energía y utilizarla, el consumo de energía durante una hora puede ser significativo económicamente.

5.2 Evaluación del área geográfica para las instalaciones de la hidroeléctrica de bombeo

A continuación describiremos la localización de los depósitos de agua a utilizar así como sus dimensiones y por lo tanto su capacidad de almacenamiento.

5.2.1 Altura de los depósitos de agua

La localización del depósito de agua que suministra el líquido a la población de la Antigua Guatemala es en el Cerro de la Cruz, ya que en este punto de la ciudad y a esta altura se puede aprovechar la fuerza de la gravedad y evitar el uso de energía eléctrica en bombas hidráulicas.

5.2.1.1 Localización del depósito principal (mayor altura)

La Antigua Guatemala se encuentra a una altura de 1530 metros sobre el nivel del mar, el área donde está situada la ciudad es bastante plana. El Cerro de la Cruz se encuentra situado en el noreste de la ciudad. El agua que es distribuida para uso de la población es bombeada desde un pozo hacia este depósito para que, por su energía potencial baje y pueda ser distribuida. La altura del depósito es de aproximadamente 25 m sobre el nivel del suelo de la ciudad.

5.2.1.2 Localización del depósito de recibo, posición del generador

El depósito de recibo, que en este caso es el pozo desde donde se bombea el agua se encuentra a una distancia de unos cuantos metros del punto donde se planea instalar el generador, la altura de la caída de agua es bastante reducida, lo que nos indica que se debe utilizar una turbina Francis o de hélice.

El generador eléctrico se encontrará situado sobre el punto donde están las derivaciones de las tuberías, en este punto debe haber un pequeño depósito de desagüe debido a que este punto de derivación se encuentra a unos metros de donde se localiza el pozo.

5.3 Determinación de los parámetros de generación

A continuación hacemos una descripción general de los parámetros a determinar en el sistema de generación. El nivel de tensión y la frecuencia de las señales generadas son los valores estándar utilizados comercialmente.

5.3.1 Nivel de tensión y frecuencia de la señal

Luego de observar y tomar nota de las características del sistema de distribución de agua municipal de la Antigua Guatemala, se ha tomado la decisión de generar energía eléctrica en baja tensión y con frecuencia estándar de 60 Hz. Se generarán voltajes de 120 V y de 220 V con una potencia máxima de 12.313 kW, con lo que se obtendrá una corriente máxima de 68 A; las pérdidas que se producen a niveles de voltaje bajos como estos son altas. Al generar a este nivel de voltaje este sistema podrá acoplarse directamente al sistema de distribución de energía para el consumo de la potencia generada por lo que implica que se cuente con un sistema de protección.

5.3.2 Determinación de la carga del sistema

En la siguiente sección se tratan puntos importantes con respecto a la capacidad del generador eléctrico a utilizar en este diseño y por lo tanto la carga que se acoplará a este sistema de generación.

5.3.2.1 El generador eléctrico

El generador eléctrico en conjunto con la turbina hidráulica son los elementos principales del sistema de generación que se está diseñando, debido a que la caída de agua tiene una altura considerada baja, se generará una potencia relativamente pequeña. Todo generador eléctrico requiere de una fuente de energía mecánica acoplada a su eje, también requiere de la magnetización de sus devanados, pero la forma en la que se origina el campo magnético en el rotor o campo depende del tipo de generador. Para nuestro sistema se propone el uso de una fuente de corriente directa para la excitación ya que se utilizará un generador sincrónico.

5.4. Características de los elementos que conforman el sistema de generación

El capítulo 2 de este informe fue dedicado al estudio de algunos fundamentos de la dinámica de fluidos ya que debemos conocer el comportamiento del fluido, es decir, el caudal, velocidad, etc., que adquiere éste dentro de una tubería y así calcular la potencia que transferirá a una turbina hidráulica.

Para este proyecto se dispone de un conjunto de tuberías ya instaladas, éstas tendrán una doble función como ya se ha mencionado. En el siguiente párrafo se describen las características de dichas tuberías.

Debido a que el flujo en la tubería debe ser monitoreado para poder mantener la velocidad de la turbina con un valor constante también se describen dos instrumentos que podrían utilizarse para la medición de flujo.

En la sección 5.4.2 se describen los cálculos de las cantidades necesarias para determinar el tipo de turbina a utilizar y a la vez se van desarrollando los cálculos para nuestro proyecto.

Todo lo referente a las conexiones eléctricas tanto del sistema de generación como al sistema para regular el flujo de agua en la tubería se describe a partir de la sección 5.4.6., en esas últimas secciones se muestran los diagramas eléctricos.

5.4.1 Tuberías de transporte

Las tuberías de transporte hacia la turbina ya están instaladas ya que estas son utilizadas para llevar el agua hacia un punto de distribución cercano al pozo donde se colocara el generador. El diámetro de las tuberías es de 8 pulgadas, son de aleación de acero, ya que soportan una presión de aproximadamente 1.1032 MPa manométricos.

Para regular la velocidad de la turbina, la cual estará acoplada directamente al generador, se puede implementar un controlador que abra o cierre la válvula que regula el flujo de agua. Se puede utilizar un controlador de un lazo que realice un control PID para obtener una mejor respuesta del sistema.

5.4.1.1 Diámetro de las tuberías

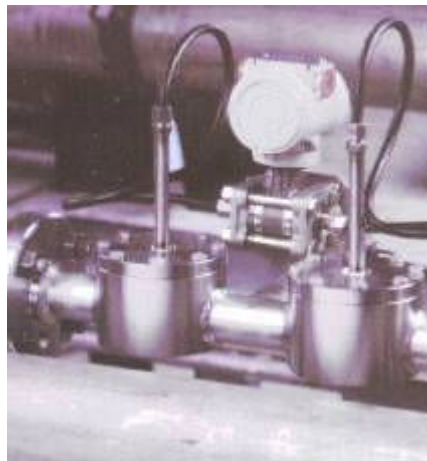
En toda central hidroeléctrica se requiere de alguna forma para conducir el agua hacia el punto donde se encuentran las turbinas; en las centrales hidroeléctricas de gran tamaño se realizan obras de ingeniería que guían el agua hacia su destino, es decir que son secciones artificiales del río. Se pueden utilizar tuberías de gran tamaño para conducir el agua también. En este proyecto se utilizarán las tuberías con las que se envía el agua a un punto de derivación en la ciudad para su distribución, estas tuberías, como ya se mencionó, tienen un diámetro de **8** pulgadas (20.32cm).

Transmisores de presión diferencial

Los transmisores son elementos que captan una señal de un proceso, por ejemplo, una presión, un nivel, etc., y proporcionan una señal equivalente de corriente, señales analógicas o señales neumáticas, las señales estándar de salida son: neumáticas de 3 a 15 psi, eléctricas de 0 a 1 mA o de 4 a 20 mA, señales analógicas de voltaje de corriente directa (0 a 10 VDC) se utilizan con más frecuencia éstas últimas.

Los transmisores de presión pueden hacer mediciones de presión manométrica, diferencial y absoluta. Actualmente los sistemas electrónicos implementados en los transmisores de presión les permiten hacer mediciones de nivel en un depósito o tanque, así como determinar el flujo en una tubería. En la figura 10 se muestra un transmisor de presión diferencial, se puede observar la adaptación realizada a la tubería por donde circula el flujo para poder captar la diferencia de presión.

Figura10. Transmisor de presión diferencial.



Fuente: ABB Instrumentation

5.4.1.2. Presiones que deben soportar las tuberías de conducción

En todo este sistema tenemos que las cantidades que se manejan son relativamente bajas cuando se comparan con las de un gran sistema de generación, el primer punto es la altura del depósito que funciona como embalse superior, como la presión que genera el agua en las tuberías se debe solamente a la energía potencial, es decir a la fuerza de gravedad, y no está ayudada por ningún equipo como bombas hidráulicas para generar presión, la potencia mecánica que se puede generar es pequeña, como se dijo antes, si se compara con la que producen grandes caídas de agua. Datos proporcionados por el departamento de aguas de la municipalidad de la Antigua Guatemala nos indican que la presión generada es de aproximadamente 1.1032 MPa.

La figura 11 muestra un medidor de flujo del tipo magnético, el fluido al cual se le está midiendo su flujo debe ser conductivo para que los sensores magnéticos lo detecten. En nuestro diseño no es conocido aun el flujo del agua, ya que el sistema de distribución de agua potable es análogo a colocar cientos de resistencias en un circuito eléctrico, para saber el flujo total de agua el paso debe estar libre, con lo cual se podría realizar una medición del mismo. La velocidad de la turbina hidráulica se puede regular controlando el flujo de agua en la tubería, y esto se puede hacer cerrando o abriendo una válvula de acuerdo a la comparación de un valor establecido de flujo y la indicación del medidor de flujo.

Figura 11. Medidor de flujo tipo magnético.



Fuente: ABB Instrumentation

5.4.2 Turbina del generador

En los siguientes numerales se presentan los fundamentos para la elección de la turbina hidráulica del proyecto y también se realizan los cálculos para determinar cual es el tipo más adecuado para este diseño.

5.4.2.1 Determinación del tipo de turbina a utilizar

Para la elección de la turbina hidráulica que se utilizará en el proyecto se definirán algunas cantidades que sirven para determinar la velocidad específica de la turbina, parámetro por el cual se le elige.

1. Velocidad unitaria

La velocidad que desarrolla una turbina hidráulica cuando una caída de agua de 1 metro de altura le proporciona energía mecánica se llama velocidad unitaria. Se describe con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\phi DN}{60} \quad \text{(Ecuación 5.1.)}$$

La letra N representa la velocidad de la turbina en revoluciones por minuto, las demás cantidades son constantes, D es el diámetro de la turbina y Φ es el factor de velocidad periférica de la turbina hidráulica.

Para determinada altura de la caída de agua, de manera general, la velocidad del fluido está dada por la ecuación 5.2:

$$V = \sqrt{2gh} \quad \text{(Ecuación 5.2.)}$$

Si se igualan estas dos ecuaciones obtenemos la velocidad de la turbina en revoluciones por minuto:

$$N = \frac{60\sqrt{2gh}}{\phi D} \quad \text{(Ecuación 5.3.)}$$

2. Potencia unitaria de la turbina

A la potencia que genera una turbina cuando opera con una caída unitaria, es decir, de 1 m, se le denomina potencia unitaria. La potencia unitaria tiene la siguiente expresión:

$$P = \frac{\gamma Q h}{1000} \quad \text{(Ecuación 5.4.)}$$

γ es el peso unitario del agua

Q es la descarga o gasto en metros cúbicos sobre segundo

h representa la altura neta en metros

$$Q = AxV = kD^2V \quad \text{(Ecuación 5.5.)}$$

La ecuación de la velocidad es:

$$V = \sqrt{2gh}$$

Si utilizamos la expresión 5.2 de la velocidad en la ecuación de la descarga tenemos:

$$Q = kD^2\sqrt{2gh}$$

Sustituimos la ecuación de la descarga en la de la potencia y obtenemos

$$P = \frac{wD^2 \sqrt{2gh}kh}{1000} = \frac{wD^2 \sqrt{2gh}^{1/2}kh}{1000}$$

Al agrupar los términos de la altura en un solo término la ecuación se simplifica a:

$$P = \frac{wD^2 \sqrt{2gh}^{3/2}k}{1000}$$

El área es el producto de una cantidad constante por el cuadrado del diámetro:

$$A = kD^2$$

La potencia tiene dos términos de los cuales depende, el diámetro de la tubería y la altura de la caída de agua:

$$P = KD^2 h^{3/2}$$

La potencia unitaria de la turbina hidráulica tiene la siguiente ecuación:

$$P_U = \frac{P}{h^{3/2}} \quad \text{(Ecuación 5.6.)}$$

La potencia unitaria se refiere a la potencia generada por la turbina con una altura de caída $h = 1$ m.

3. Descarga unitaria

Se refiere a la descarga que recibe la turbina cuando ésta está operando a una altura de caída de 1 m. La expresión de la descarga es:

$$Q = A \times V$$

El área de la tubería y la velocidad del fluido son respectivamente:

$$A = kD^2$$
$$V = \sqrt{2gh}$$

Al multiplicar estos términos tenemos la expresión de la descarga:

$$Q = kD^2 \sqrt{2gh}^{1/2}$$

Entonces la descarga unitaria se determina dividiendo la descarga entre la raíz cuadrada de la altura:

$$Q_U = kD^2 \sqrt{2g}$$
$$Q_U = KD^2 \quad \text{(Ecuación 5.7.)}$$

4. Velocidad específica de una turbina:

La velocidad específica de una turbina es aquella que alcanza una turbina similar geoméricamente a otra cuando trabaja a una altura unitaria y genera también una potencia unitaria. La velocidad específica de la turbina es utilizada para seleccionar el tipo de la turbina requerida en un proyecto determinado de una hidroeléctrica.

Cuando se conoce la velocidad específica se puede calcular la velocidad normal de operación de la turbina. La velocidad específica de la turbina también nos permite estimar el funcionamiento de la misma. Utilizaremos la ecuación 5.8 la cual representa la potencia de la turbina:

$$P = \frac{\gamma Q h}{1000} \quad \text{(Ecuación 5.8.)}$$

Ya se han obtenido las ecuaciones de la descarga o gasto y de la potencia:

$$Q = D^2 h$$

$$P = D^2 h^{3/2}$$

Se puede obtener el valor de D igualando las ecuaciones de la velocidad:

$$D = \frac{60\sqrt{2g}\sqrt{h}}{N\phi} = K \frac{\sqrt{h}}{N}$$

Sustituyendo en la ecuación de la potencia:

$$P = \left(\frac{\sqrt{h}}{N} \right)^2 h^{3/2} = \frac{h^{5/2}}{N^2}$$

Ahora podemos obtener la velocidad de la turbina en función de la potencia y la altura de la caída de agua:

$$N = \sqrt{\frac{h^{5/2}}{P}} = \frac{h^{5/4}}{\sqrt{P}} \quad \text{(Ecuación 5.9.)}$$

La velocidad de la turbina se puede expresar en función de la velocidad específica de la siguiente manera:

$$N = N_s \frac{h^{5/4}}{\sqrt{P}}$$

De esta última ecuación podemos despejar la velocidad específica, que resulta ser:

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{h^{5/4}} \quad \text{(Ecuación 5.10.)}$$

La tabla III muestra los rangos de las velocidades específicas que alcanzan los tres tipos de turbinas más utilizadas para generar potencia mecánica:

Tabla III. Clasificación de turbinas de acuerdo a su velocidad específica

Turbina	Tipo	Velocidad específica
Pelton	Impulso	0 a 20
Francis	Reacción	20 a 100
Kaplan	Reacción	100 a 200

Fuente: Joseph B. Franzini; E. John Finnemore. Mecánica de Fluidos con aplicaciones en Ingeniería. Pág. 458.

Cálculos para elegir la turbina del proyecto

De acuerdo a los análisis que se realizan con la mecánica de fluidos se puede obtener la ecuación que se utiliza para calcular la potencia de entrada de un fluido a la cámara una turbina hidráulica, la cual es la siguiente (1-96):

$$\text{Potencia en kilowatts} = \frac{\gamma Q h}{1000}$$

En la ecuación de la potencia las cantidades se definen de esta manera:

γ = el peso unitario del fluido (N/m³).

Q = el caudal en m³/s

h = la energía por unidad de peso en m.

Primero calcularemos la potencia y la descarga que se produce en la turbina, utilizaremos las ecuaciones ya conocidas:

$$Q = D^2 \sqrt{h}$$

$$\text{Potencia en kilowatts} = \frac{\gamma Q h}{1000}$$

El diámetro de la tubería es de 8 pulgadas, pero se hará una reducción para que la velocidad del chorro sea mayor, la altura del depósito de agua es de aproximadamente 25 m, entonces debemos realizar las conversiones a dimensiones equivalentes. Como la descarga se trabaja en metros cúbicos por segundo pasaremos las 8 pulgadas a metros.

$$D = 8 \text{ pulg} \times \frac{0.0254 \text{ m}}{1 \text{ pulg}} = 0.2032 \text{ m}$$

El cuadrado de D es 0.0413m^2

$$Q = kD^2 \sqrt{2gh}$$

La constante k que aparece en la ecuación del caudal resulta ser el valor de Π , y en la ecuación de la potencia γ es el peso específico del agua que tiene un valor de 9.777 kN/m^3 . Con las cantidades ya conocidas podremos saber el caudal de la tubería y también la potencia que se le entrega a la turbina hidráulica:

$$Q = \frac{\pi}{4} (0.0413) \sqrt{2 \times 9.8 \times 25} = 0.718 \text{ m}^3/\text{s}$$

La temperatura ambiente en la ciudad de la Antigua Guatemala es de aproximadamente 25°C en promedio, es por ello que el peso unitario del agua para esta temperatura se toma como 9.777 kN/m^3 . Debido a que en este proyecto se utilizará un inyector la velocidad del fluido en la tubería no es igual a la que hemos calculado. Se debe tomar en cuenta el coeficiente de velocidad en la tubería, también se toma en cuenta la pérdida de carga a través del inyector dependiendo de la forma del mismo. Para nuestra tubería de 8 pulgadas supondremos un coeficiente de fricción $f = 0.025$, la longitud de la tubería es de aproximadamente 55.90 m , $(25^2 + 50^2)^{1/2}$. Debido a la fricción existente en la tubería, la velocidad real del fluido es distinta a la velocidad ideal del mismo, la relación entre estas dos velocidades es lo que se llama **coeficiente de velocidad** (1-322). De acuerdo a la forma de conexión entre el depósito y la tubería (conexión recta) que tenemos en nuestro depósito principal, se puede suponer un coeficiente de velocidad $C_V = 0.82$. La relación entre la pérdida de carga y el coeficiente de velocidad en la tubería se expresa de la siguiente manera (1-324):

$$h_{P1-2} = \left(\frac{1}{C_V^2} - 1 \right) \frac{V_{ch}^2}{2g} \quad \text{(Ecuación 5.11.)}$$

Al sustituir el coeficiente de velocidad en esta última expresión tenemos:

$$0.05 \frac{V_{ch}^2}{2g}$$

Entonces aplicando la ley de conservación de la energía expresada en dimensionales de la altura:

$$25m - 0.025 \frac{55.90}{0.2032} \frac{V^2}{2g} - 0.05 \frac{V_{ch}^2}{2g} = \frac{V_{ch}^2}{2g} \quad \text{(Ecuación 5.12.)}$$

La ecuación 5.13 expresa la relación entre la velocidad del fluido en la tubería y la velocidad del chorro:

$$V_{ch} = \left(\frac{\phi_{tuberia}}{\phi_{chorro}} \right)^2 V \quad \text{(Ecuación 5.13.)}$$

Sustituimos los diámetros en la última expresión:

$$V_{ch} = \left(\frac{0.2032m}{0.1016m} \right)^2 V$$
$$V_{ch} = 4V$$

Al sustituir V_{ch} en la ecuación de la ley de conservación de la energía podremos obtener la velocidad del fluido en la tubería:

$$25m - 0.025 \frac{55.90}{0.2032} \frac{V^2}{2g} - 0.05 \frac{(4V)^2}{2g} = \frac{(4V)^2}{2g}$$

$$25m = 6.88 \frac{V^2}{2g} + 0.8 \frac{V^2}{2g} + 16 \frac{V^2}{2g} = 23.68 \frac{V^2}{2g}$$

Ahora podemos obtener el valor de la velocidad en la tubería:

$$V = \sqrt{\frac{25 \times 2 \times 9.81}{23.68}} = \sqrt{20.71 \frac{m^2}{s^2}} =$$

$$V = 4.55 \frac{m}{s}$$

La velocidad del chorro es 4 veces la velocidad del fluido en la tubería:

$$V_{ch} = 4(4.55 \frac{m}{s}) = 18.20 \frac{m}{s}$$

Con estos datos es posible calcular la potencia de entrada a la turbina que le proporciona el chorro de agua:

$$\text{Potencia en kilowatts} = \frac{\rho Q h}{1000}$$

El caudal en la tubería es:

$$Q = A \times V = \frac{\pi}{4} (0.0413) \times 4.55 \frac{m}{s}$$

$$Q = 0.148 \frac{m^3}{s}$$

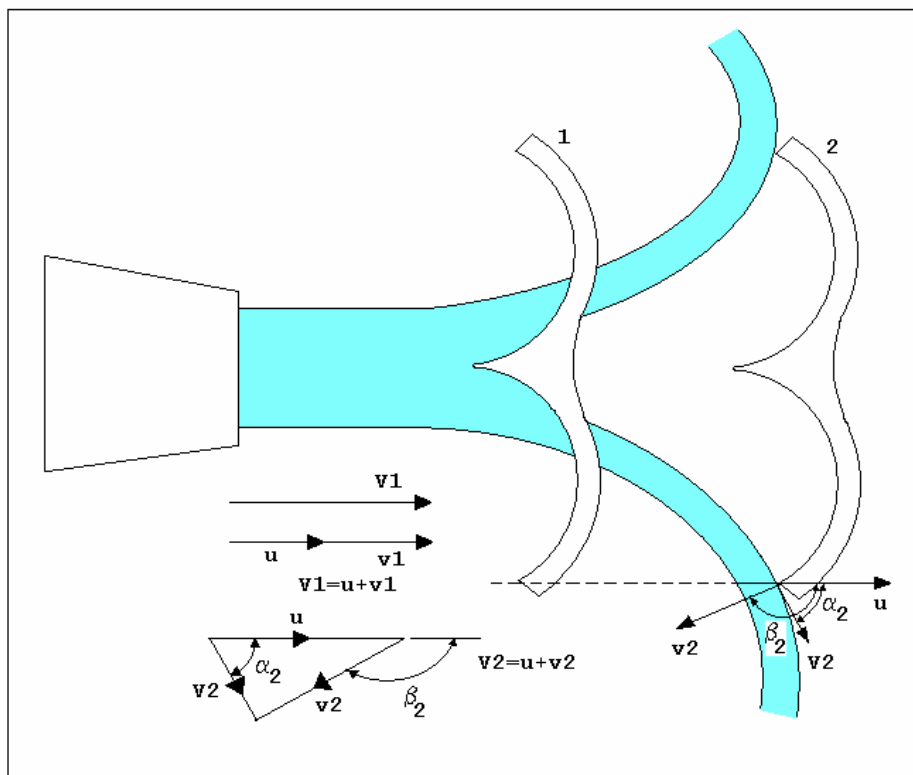
La potencia de entrada se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Potencia en kilowatts} = \frac{9777(0.148)25}{1000}$$

$$\text{Potencia en kilowatts} = 36.175 \text{ kilowatts}$$

Para poder calcular la potencia transmitida al eje de la turbina por el agua que entra a la cámara de la misma se debe realizar un análisis de la velocidad que tiene el agua al entrar a la cámara y la que adquiere al abandonar la turbina. Utilizaremos la figura 12 para visualizar las velocidades del agua.

Figura 12. Representación vectorial de las velocidades del agua en la turbina hidráulica.



Fuente: Joseph B. Franzini, E. John Finnemore, Mecánica de Fluidos con aplicaciones en Ingeniería. Página 443.

En la figura 12 se puede observar el vector u , el cual representa la velocidad tangencial que adquiere la turbina. La posición 1 muestra el momento en que el líquido hace contacto inicial con la cuchara y la posición 2 el momento en el que el agua abandona la cuchara. La velocidad V_1 es la velocidad del líquido cuando entra a la cuchara y la velocidad V_2 es la que adquiere cuando la abandona. Los vectores v_1 y v_2 representan las velocidades relativas del agua con respecto a las cucharas de la turbina hidráulica. Si la fricción es despreciable la velocidad relativa de entrada permanece constante. Analizando los diagramas vectoriales se puede obtener la ecuación que define la fuerza ejercida por el agua sobre la cuchara en la dirección del movimiento:

$$F = \rho Q(V_1 - V_2 \cos \alpha_2) \quad \text{(Ecuación 5.14.)}$$

en esta expresión Q es el caudal de descarga de la tubería. Al asumir las velocidades relativas iguales podemos tener la expresión de la siguiente:

$$F = \rho Q(v_1 - v_2 \cos \beta_2) = \rho Q(V_1 - u)(1 - \cos \beta_2) \quad \text{(Ecuación 5.15.)}$$

El producto de la velocidad tangencial de la turbina y la fuerza que produce el movimiento representa la potencia transmitida a las cucharas y se representa de la siguiente forma:

$$F = \rho Q(v_1 - v_2 \cos \beta_2) = \rho Q(V_1 - u)(1 - \cos \beta_2)$$

En la mayoría de turbinas hidráulicas tipo Pelton se utilizan cucharas con un borde divisorio (1-442), con lo que se consigue que el agua entre casi tangencialmente a las mismas. Vamos a suponer algunos valores para calcular un estimado en la potencia que entrega el líquido a las cucharas de la turbina.

Se dice que para una buena eficiencia el ancho del álabe debería ser de tres a cuatro veces el diámetro del chorro, y el diámetro de la rueda normalmente es de quince a veinte veces el diámetro del chorro (1-442). La tubería que transporta el agua en este proyecto es de 0.2032 m (8 pulg.), si la reducimos a la mitad para tener un chorro con un diámetro de 0.1016 m (4 pulg.) resulta ser que el diámetro mínimo de un alabe sería de 30.48 cm (3 x 10.16 cm) y el diámetro de paso de la turbina sería 1.524 m (15x10.16 cm). El diámetro total de la turbina es de 2.14 m. Si se asume un ángulo de cuchara $\beta_2 = 160^\circ$, una velocidad mecánica de 200 rpm, velocidad que se requiere para el funcionamiento de un generador de 36 polos, se pueden calcular las cantidades antes descritas.

Para obtener la velocidad tangencial u de la turbina utilizamos la velocidad angular, que en este caso son 200 rpm convertida a rad/s, y el diámetro de paso que en este caso es de 1.524 m.

$$u = \omega r = 200rpm \times \frac{2\pi}{60} \times \frac{1.524}{2} =$$

$$u = 15.96 m/s$$

La velocidad de entrada a la turbina en este proyecto es de 18.20 m/s, entonces tenemos que la velocidad relativa del agua con respecto a las cucharas de la turbina es la diferencia entre estas dos últimas velocidades:

$$v_1 = V_1 - u$$

$$v_1 = 18.20 m/s - 15.96 m/s =$$

$$v_1 = 2.24 m/s$$

(Ecuación 5.16.)

Las dos velocidades relativas de entrada y salida de la turbina se han considerado iguales:

$$v_1 = v_2 = 2.24 \frac{m}{s}$$

La fuerza aplicada a las cucharas es función del diferencial entre las velocidades relativas que se producen tangencialmente.

Con este último dato ya podemos calcular el diferencial de velocidad:

$$\begin{aligned}\Delta v_x &= v_{2x} - v_{1x} \\ \Delta v_x &= -2.10 \frac{m}{s} - 2.24 \frac{m}{s} \quad \text{(Ecuación 5.17.)} \\ \Delta v_x &= -4.34 \frac{m}{s}\end{aligned}$$

Al realizar un análisis de los diagramas vectoriales se puede comprobar que:

$$\Delta V_x = \Delta v_x \quad \text{(Ecuación 5.18.)}$$

Entonces la fuerza aplicada sobre las cucharas es:

$$F = \rho Q (\Delta V_x) \quad \text{(Ecuación 5.19.)}$$

La densidad del agua es de 1000 kg/m^3 y el flujo en la tubería es de $0.148 \text{ m}^3/\text{s}$, entonces sustituimos estas cantidades en la ecuación 5.19 de la fuerza y obtenemos:

$$\begin{aligned}F &= \rho Q (\Delta V_x) = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(0.148 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \left(4.34 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \\ F &= 643.04 \text{ N}\end{aligned}$$

Conociendo la fuerza ejercida sobre las cucharas podemos saber el par en el rodete, el par se calcula con la ecuación 5.20:

$$T = Fr \quad \text{(Ecuación 5.20.)}$$

Estos datos ya son conocidos, por lo que obtenemos lo siguiente:

$$T = Fr = 643.04N \times \left(\frac{1.524m}{2} \right)$$

$$T = 490.00N \cdot m$$

La potencia que se entrega al eje es el producto del par por la velocidad angular:

$$P = T\omega = 490.00N \cdot m \times 25.13 \text{ rad/s} \quad \text{(Ecuación 5.21.)}$$

$$P = 12.313kWatts$$

Con este dato se puede estimar la potencia del generador eléctrico, la potencia eléctrica real que se genere será de 12.313 kWatts. De acuerdo al flujo calculado $0.148\text{m}^3/\text{s}$ el volumen de deposito de 55.065m^3 se vaciaría en 372 s, o sea, en 6.20 minutos.

Para calcular la energía que se puede generar se debe de integrar en el intervalo de tiempo de demanda

$$EE = \int Piddt \quad \text{(Ecuación 5.22)}$$

La potencia que hemos calculado no se encuentra en función del tiempo, es una cantidad que se mantendrá constante por el sistema de regulación de flujo. El tanque se vaciará en 6.20 minutos, en horas esto equivale a:

$$t_{\text{vaciado}} = 6.20 \text{ min} \times \frac{1h}{60 \text{ min}} = 0.103 \text{ hora}$$

La energía que generará la turbina la obtenemos realizando el producto de la potencia y el tiempo de vaciado del depósito principal:

$$\text{Energía} = 12.313 \text{ kW} \times 0.103 \text{ h} = 1.272 \text{ kWh}$$

La turbina generará 1.272 kWh, más adelante realizaremos el balance entre la energía que se puede generar y la que está consumiendo la bomba para poder llenar el depósito principal. De acuerdo a los datos que ha proporcionado la municipalidad de la Antigua Guatemala sabemos que la potencia de la bomba es mucho mayor que la de la turbina calculada, el objetivo de este proyecto es reducir el costo en el consumo de energía aunque sea en una pequeña cantidad.

Ahora procederemos a calcular la velocidad específica de la turbina, la ecuación 5.10 es la que debemos utilizar, la potencia esta en CV y la altura en pies en esta ecuación. Al hacer las conversiones correspondientes se obtienen los siguientes valores y se calcula la velocidad específica de la turbina:

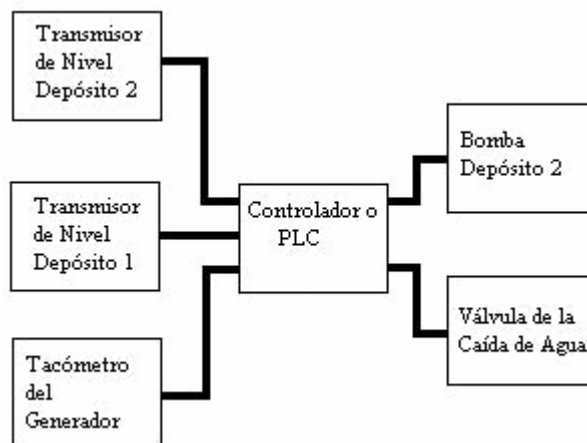
$$N_s = \frac{200\sqrt{16.51}}{(82)^{5/4}} = \frac{812.64}{246.75}$$
$$N_s = 3.29 \text{ rpm}$$

De acuerdo a la tabla de velocidades específicas se deberá utilizar una turbina tipo Pelton. Las turbinas Pelton operan a velocidades específicas bastante bajas y por lo general su tamaño es mayor al de los otros tipos de turbinas. En la fabricación de la turbina se debe tomar en cuenta el efecto de la cavitación, existen parámetros que indican si la turbina cavitará, pero no está a nuestro alcance realizar el cálculo de dichos parámetros.

Cómo controlar los niveles de los depósitos

La figura 13 nos muestra un esquema de cómo se regularán los niveles de los depósitos de agua, lo cual funciona de la siguiente forma: si el nivel del depósito superior está en el límite inferior, se deberá bombear del pozo y no deberá de abrirse la válvula de la tubería hacia la turbina, entonces no habrá generación hasta que se eleve el nivel; también será necesario monitorear el nivel del pozo por si éste ya está en su nivel superior. Tomando en cuenta las condiciones anteriores, la velocidad mecánica del generador será controlada por medio de un control PID de la válvula de la tubería.

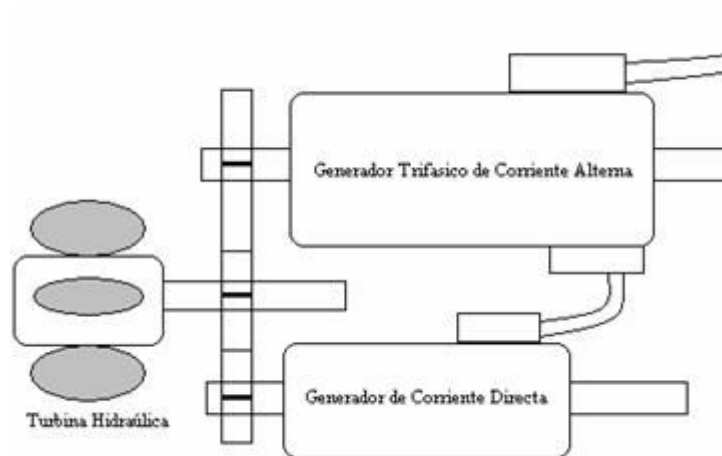
Figura 13. Esquema que representa como se regularan los niveles de los depósitos



5.4.2.2 Acoplamiento del generador con la turbina

El generador debe estar acoplado a su primotor, que en este caso es una turbina hidráulica, ya que los dos generadores requieren de potencia mecánica para generar cada uno su tipo de corriente, es decir, así como un generador de corriente alterna requiere de potencia mecánica para su funcionamiento también uno de corriente directa lo requiere, la figura 14 muestra una forma de acoplar los generadores para que utilicen la misma fuente de potencia mecánica, se puede notar la diferencia en el tamaño del generador de corriente directa.

Figura 14. Acoplamiento de lo generador con la turbina



5.4.3 Bombas hidráulicas para retorno a depósito principal

Para nuestro diseño es necesaria la implementación de bombas hidráulicas debido a que el objetivo principal de la central hidroeléctrica es la reutilización del líquido que ya ha entregado su energía cinética a la turbina hidráulica.

5.4.3.1 Determinación de la cantidad de bombas y potencia requerida

En las centrales hidroeléctricas de bombeo de mayor tamaño se utilizan generadores que son reversibles, es decir que pueden trabajar como generadores o como motores, entonces las turbinas en lugar de obtener energía cinética del agua se la proporcionan a la misma, pero en nuestro diseño no se utilizarán este tipo de máquinas.

En el sistema de distribución de agua potable se utiliza una bomba para enviar el agua hacia el depósito que sirve como embalse superior en el proyecto. El sistema de bombeo utiliza una bomba, la cual fue calculada de acuerdo a la altura del depósito, las características de la bomba son las que se pueden leer en la tabla IV, éstas fueron proporcionadas por la municipalidad de la Antigua Guatemala:

Tabla IV. Características de la bomba del pozo la Candelaria II, la Antigua Guatemala, Sac.

Marca:	F.E. Myers
Tipo:	Sumergible
Capacidad:	100 HP

Fuente: Municipalidad de la Antigua Guatemala

En la tabla IV podemos observar que el consumo de energía de la bomba hidráulica es mucho mayor que la energía que se puede generar con la central hidroeléctrica, pero una característica importante de este proyecto es la adaptación del sistema de generación a los elementos existentes, y por lo tanto generar una pequeña cantidad de energía cada día, a largo plazo será un beneficio.

Haciendo un balance de energías, es decir, la energía eléctrica generada con nuestro sistema y la energía eléctrica consumida por la bomba hidráulica.

$$1 \text{ hp} = 0.746 \text{ kW}$$

La bomba que se utiliza tiene una potencia de 74.6kW. Con esta bomba se llenara el depósito principal que tiene un volumen de 55065 litros. Esta bomba Myers tiene la capacidad de enviar 153litros por segundo. Para llenar el depósito completamente requiere de:

$$t_{\text{llenado}} = \frac{55065 \text{ litros}}{153 \text{ litros/s}} = 359.9s$$

$$t_{\text{llenado}} = 359.9s \times \frac{1 \text{ min}}{60s} = \frac{1h}{60 \text{ min}} = 0.09997 \text{ hora}$$

La energía demandada por esta bomba es de:

$$Energia = 74.6kW \times 0.09997h$$

$$Energia = 7.46kWh$$

Tabla V. Balance de energías de la central hidroeléctrica.

Máquina	Energía consumida en kWh	Energía generada en kWh
Bomba hidráulica	7.46	0
Turbina hidráulica	0	1.272

Como podemos observar la energía que consume la bomba hidráulica es mucho mayor que la se puede generar con la turbina que hemos calculado. Se podrá recuperar un 17.05% de la energía consumida por la bomba hidráulica, este porcentaje es bastante pequeño.

Se pueden hacer algunas modificaciones a la obra civil para poder generar más potencia mecánica, por ejemplo, se pueden utilizar tuberías de mayor diámetro, también construir un depósito a mayor altura, etc., pero el objetivo es utilizar los elementos presentes sin hacer muchas modificaciones.

5.4.4. Sistema de medición y protección del generador eléctrico

En todo sistema eléctrico es necesario implementar sistemas de medición y protección no importando las dimensiones del mismo, a continuación describimos los sistemas a utilizar para este fin.

5.4.4.1 Medidor de energía trifásico

En el mercado existen medidores de energía trifásica totalmente digitales, con lo cual se aumenta grandemente su precisión, además pueden medir los tres tipos de potencias (real, reactiva y aparente). Como otras opciones de estos medidores se tienen salidas analógicas estándar dadas en miliamperios (4 a 20 mA), que pueden ser utilizadas para activar los dispositivos de protección del sistema de generación

5.4.4.2. Red de tierras

En cualquier sistema eléctrico, no importando su tamaño, es necesario que se implemente una red de tierras, éste es necesario para la protección del personal que opere en la central y también para tener una referencia exacta y estable de los voltajes y corrientes, ya que se piensa generar con voltajes trifásicos dicha referencia es muy necesaria. En el sistema de tierras se utiliza una combinación de materiales que se depositan en el suelo donde se coloca la red para disminuir la resistencia del suelo. En las subestaciones es necesario que no se dejen secciones abiertas de la red de tierras para que no existan diferencias de potencial que pueden ser peligrosas para los operadores.

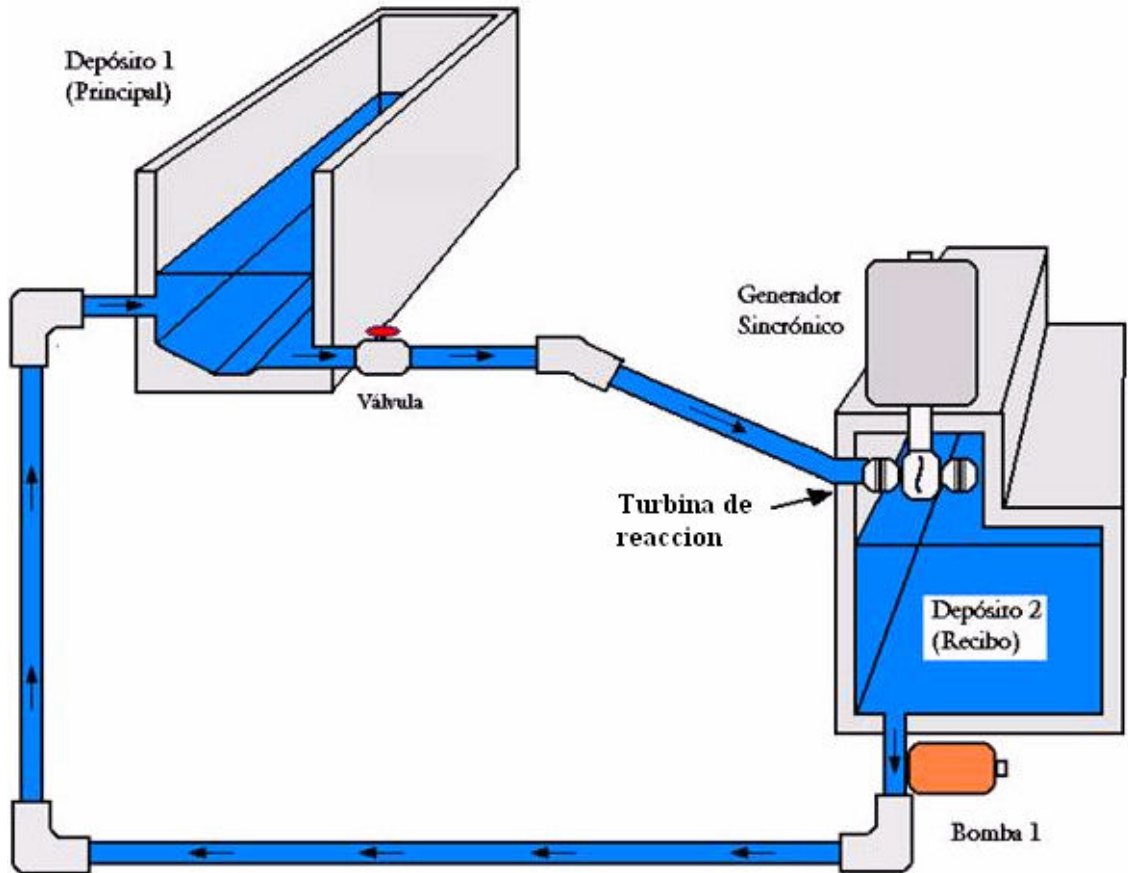
5.4.5. Diagramas del proyecto

El esquema general de la figura 15 muestra como se realiza el proceso de generación, no se representa el pozo desde donde es bombeada el agua para retornarla, todo el sistema se representa de una forma muy general. En los diagramas desarrollados se podrá comprender con mayor facilidad las partes del sistema.

5.4.5.1. Esquema general

En figura 15 se muestra un esquema general del diseño del proyecto, se puede observar el depósito principal denominado depósito 1, este depósito se encuentra en el Cerro de la Cruz. En las centrales hidroeléctricas de gran escala se utilizan compuertas para controlar el paso del agua, en este diseño se utilizará una llave o válvula. Para la elección de la válvula se deben tomar en cuenta las presiones de entrada y de salida, el material que circula por ella, en este caso agua, la capacidad, la rigidez de actuador, el material del obturador, etc. Se muestran también las tuberías de conducción, las cuales deben de soportar la presión generada por el agua, como puede verse, existe una inclinación en la tubería, la cual hace notar la diferencia de alturas de los depósitos. En esta figura no se muestra la casa de máquinas, pero ésta se situará sobre el depósito 2 o de recibo, aquí se encuentra también el generador, que es uno del tipo sincrónico. La fuente de excitación del generador no se muestra pero será una máquina de corriente directa. Se muestran dos bombas de retorno del agua, en el proyecto solo se utilizará una bomba, la cual ya forma parte del sistema de bombeo de la municipalidad de la Antigua Guatemala.

Figura 15. Esquema general central hidroeléctrica de bombeo para la Antigua Guatemala.



La figura 16 es un diagrama que presenta de forma más real el proyecto diseñado, como puede observarse, la posición del generador no es la misma que la del pozo. En la posición de la turbina puede verse un pequeño depósito que sirve para almacenar momentáneamente el agua que entrega su energía cinética y luego se traslada al pozo nuevamente. Los transmisores de nivel que se representan en el plano no se encuentran actualmente, si se implementan aumentarían grandemente la eficiencia del sistema de distribución de agua potable así como el de generación de energía eléctrica.

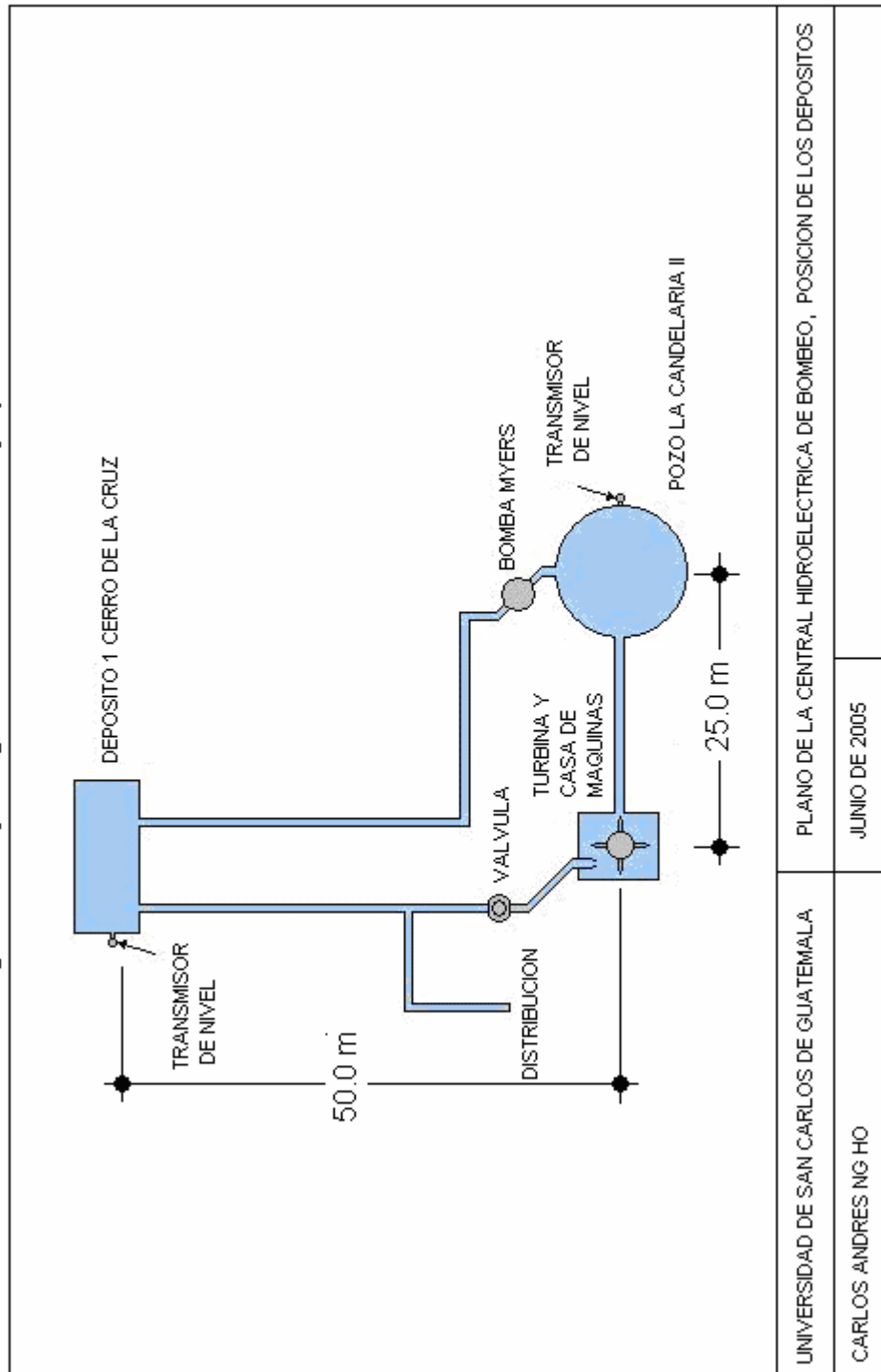
El control del nivel de los depósitos es necesario debido a que el agua se utilizará para generar energía eléctrica pero la función principal de los depósitos es la distribución del agua potable, entonces en épocas del año en las que no hay lluvia el sistema de generación de energía posiblemente no entre en funcionamiento. Los medidores de nivel y sus transmisores pueden ser del tipo ultrasónico ya que estos pueden compensar los errores en la medición debido a turbulencias en el líquido, dichas turbulencias se crearan durante el llenado de los depósitos. También pueden utilizarse transmisores de presión para realizar las mediciones de nivel de los depósitos.

La tubería que comunica el depósito de la casa de máquinas con el pozo la Candelaria II también debe tener un diámetro de 0.2032 m o mayor para que el agua que se va acumulando pueda ser drenada a dicho pozo en un tiempo adecuado ya que el nivel del depósito también debe ser controlado. La válvula que se muestra será utilizada para regular el flujo de agua y por lo tanto la velocidad de la turbina hidráulica, pero cuando el sistema de generación no esté en funcionamiento ésta deberá cerrarse completamente por lo que toda el agua se dirigirá al sistema de distribución. Como el control de flujo no es “on-off” la válvula debe ser del tipo neumático ya que el actuador que utilizan estas válvulas puede ser controlado de forma proporcional; se requerirá de un sistema de compresión de aire para poder controlar el actuador de la válvula. Como se menciona más adelante en el diagrama del sistema de regulación de flujo de agua, se requiere de un transductor de corriente a presión, el cual convierte la salida de corriente del controlador a una equivalente del tipo neumática.

El plano de la figura 16 puede no ser el mismo que se encuentra en los planos de la obra civil con que cuenta la municipalidad de la Antigua Guatemala ya que en éste no se muestran los componentes que controlan el paso del líquido hacia el depósito que se encuentra en el Cerro de la Cruz.

Anteriormente se ha llamado depósito 2 al pozo la Candelaria II, en el sistema de control de niveles se menciona que deben utilizarse un transmisor de nivel en cada depósito, estos transmisores se representan en el diagrama. Un nivel bajo en el depósito principal hará que el controlador o PLC envíe una orden al sistema para que la bomba se accione, un nivel alto hará que ésta se detenga, lo mismo deberá ocurrir cuando el nivel del pozo sea bajo, ya que si la bomba se acciona sin líquido puede dañarse por sobrecalentamiento.

Figura 16. Esquema general de la obra civil del proyecto.



5.4.5.2. Dimensiones de la casa de máquinas de la central hidroeléctrica

La figura 17 representa la casa de máquinas donde se encuentran los dispositivos de protección y medición del sistema de generación, en éste solamente se muestra la turbina hidráulica, no se muestra ningún dispositivo de protección ni la fuente de excitación del generador. En la casa de máquinas se encuentra la turbina hidráulica y el generador eléctrico. En este proyecto las estructuras que se construyan no deben modificar la infraestructura de la ciudad sino que deben adaptarse a ella; como puede observarse en el plano, la casa de máquinas se construirá de forma subterránea, el sistema de bombeo al que se adaptará el de generación de energía eléctrica ya está construido de forma subterránea.

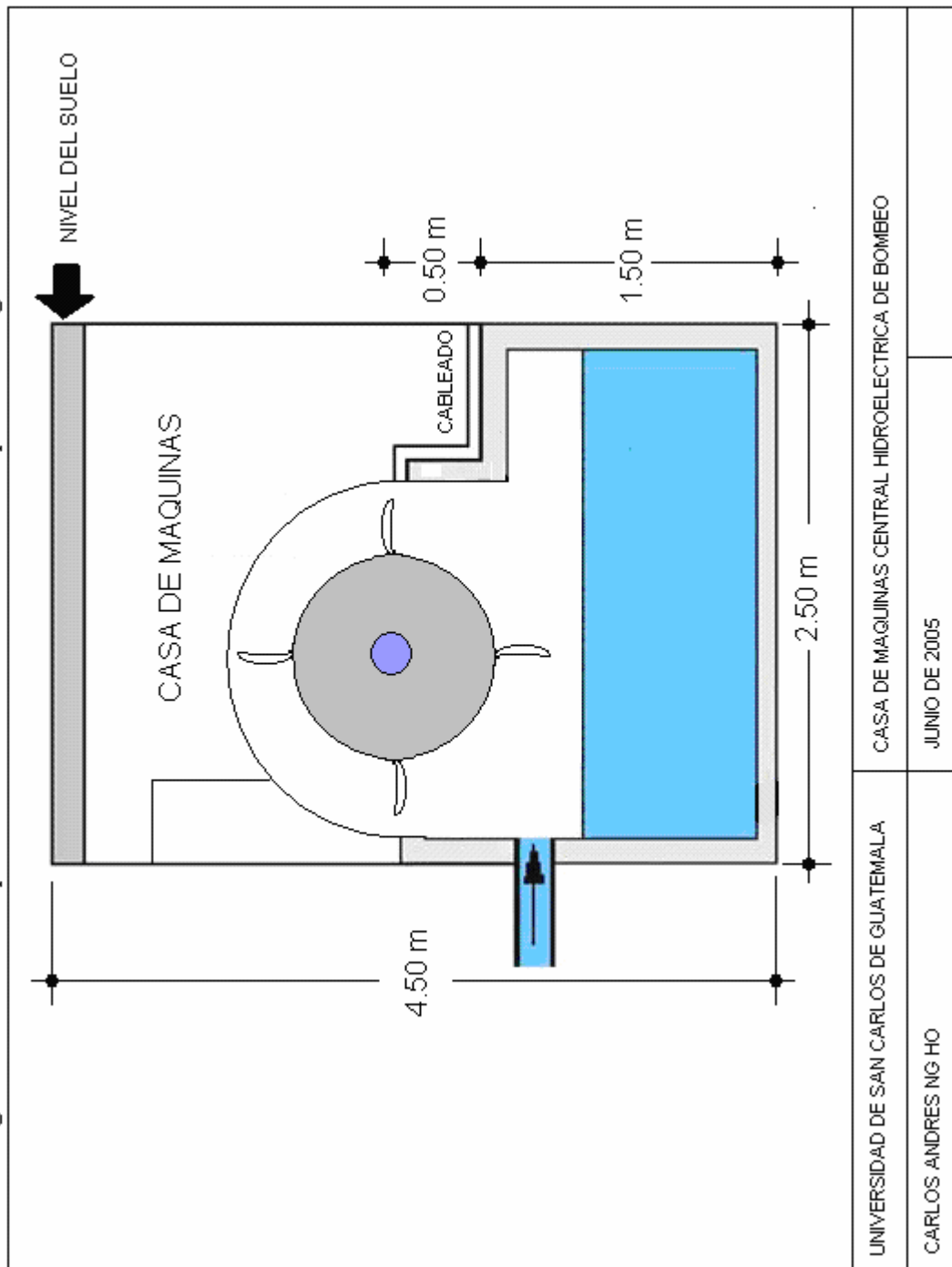
Debido a las leyes existentes para la conservación del patrimonio nacional, el Consejo para la Conservación de la Antigua Guatemala no permite la modificación del estilo colonial de esta ciudad, por lo que se deberán diseñar estructuras que cumplan con dichas normas.

Las turbinas Pelton no se encuentran sumergidas en el agua, con este hecho solamente aprovechan la velocidad que les proporciona el agua que va entrando a la cámara pero no la presión que ejercen las capas de agua entre ellas.

Las dimensiones de la casa de máquinas se muestran en la figura, como ya se mencionó y como puede observarse, ésta se construirá de forma subterránea y por ello se da como referencia el nivel del suelo. La salida de agua del depósito que comunica el mismo con el pozo de bombeo no se muestra debido a que ésta se encuentra a 90° de la entrada al depósito.

Más adelante se muestra el diseño de los paneles eléctricos que se utilizarán para el sistema de generación de energía y el sistema de regulación de flujo de agua en la tubería, dichos paneles se encontrarán en la casa de máquinas. Los paneles serán especificados para que cumplan con las normas de protección contra humedad e intemperie (IP 66 e IP67) al igual que los dispositivos que se encuentran dentro de ellos.

Figura 17. Casa de máquinas central hidroeléctrica de bombeo para la Antigua Guatemala.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

CASA DE MAQUINAS CENTRAL HIDROELECTRICA DE BOMBEO

CARLOS ANDRES NG HO

JUNIO DE 2005

5.4.5.3. Montaje de la turbina hidráulica

Desde una vista lateral de la casa de máquinas en la figura 18 se puede observar que el agua golpea las hélices a 90° en la turbina. El depósito que sirve para almacenar el agua utilizada momentáneamente antes de ser enviada de nuevo al pozo también se muestra en la figura. El rodete de la turbina, por lo general, tiene un diámetro total de quince a veinte veces el diámetro del chorro de agua, en este caso, el diámetro del chorro es de 10.16 cm, entonces tenemos que el rodete de la turbina hidráulica tendrá un diámetro de 152.4 cm.

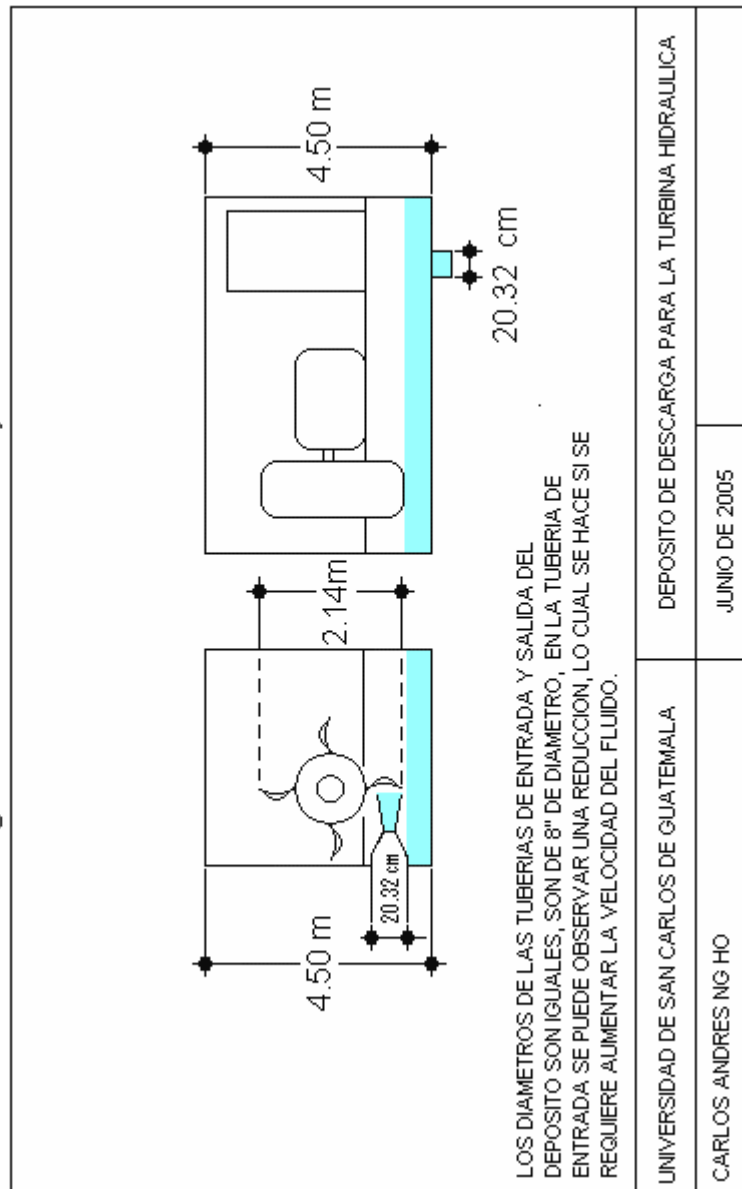
Como puede observarse, la figura solamente muestra la dirección del agua al golpear la turbina, la turbina de la figura es una tipo Kaplan. El depósito debe almacenar momentáneamente el agua que se va descargando en la turbina, el volumen de este depósito temporal debe estimarse de acuerdo al flujo que ya se ha calculado y debe adaptarse a la infraestructura ya existente como ya se ha mencionado.

En el diagrama se puede leer un comentario sobre las medidas de las tuberías de entrada y de salida. El flujo de salida del depósito tendrá un valor mayor o igual al flujo de entrada, por lo que la tubería que se utilizará para que el agua retorne al pozo será de un diámetro igual o mayor a la de la tubería de entrada al depósito.

No se debe olvidar que toda el agua que se esté utilizando para generar la energía eléctrica también será utilizada para el consumo humano, por lo tanto, es recomendable que el depósito esté recubierto de algún material que evite la formación de microorganismos en sus paredes. Está de más mencionarlo, pero la tapa del depósito debe ser una estructura lo suficientemente fuerte debido a que sobre ella se instalará el generador eléctrico y los demás componentes de la casa de máquinas.

Para estos diámetros de tuberías ya no se utilizan elementos roscados, sino que se utilizan “flanges” o bridas para realizar las conexiones de tuberías; debido a que se planea utilizar una válvula neumática para regular el flujo, entonces se debe tomar en cuenta esta condición.

Figura 18. Instalación de la turbina y la tubería.



5.4.6. Diagramas eléctricos

Los diagramas eléctricos que se presentan a continuación están divididos en: diagramas del sistema de generación de energía, y diagramas del sistema de regulación de flujo en las tuberías de conducción.

5.4.6.1. Diagrama unifilar del sistema de generación

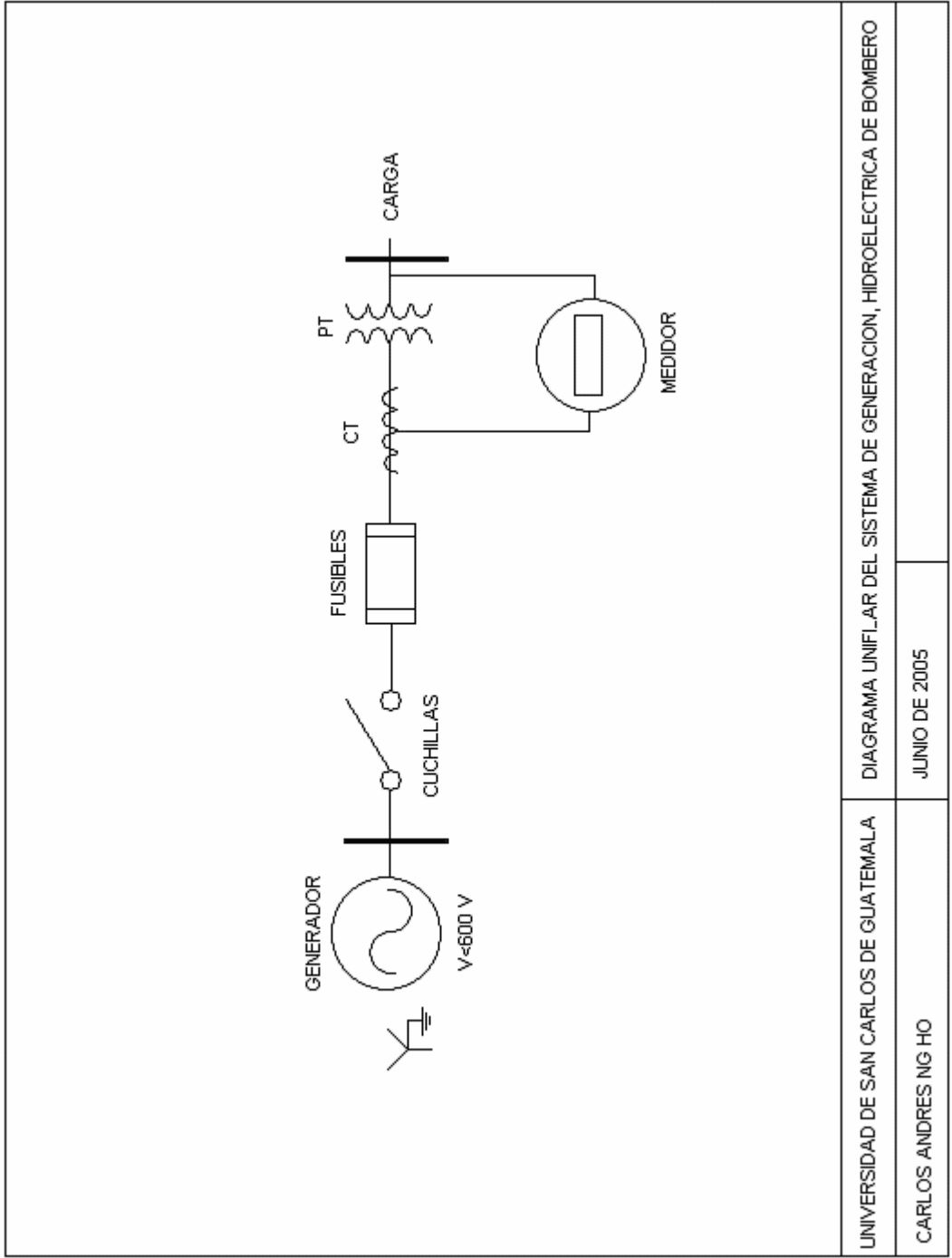
La figura 19 es el diagrama eléctrico unifilar, en ésta se muestran los elementos utilizados para el sistema de generación así como los elementos que se utilizarán para protegerlos. El sistema es bastante simple, se utilizará un generador sincrónico, el cual, como ya se ha mencionado, requiere de una fuente de corriente directa para funcionar, ya que con la corriente directa se crea el campo magnético en los devanados del rotor y luego se inducen al estator las ondas de voltaje trifásico.

El generador eléctrico se protegerá por medio de fusibles, los cuales serán calculados utilizando curvas similares a las utilizadas para calcular los relevadores de sobrecorriente en alta tensión; se debe contar con alguna forma de interrupción del circuito para realizar mantenimiento o reparaciones en el sistema, por ello se utilizarán interruptores termomagnéticos.

Inicialmente el sistema de generación solamente será utilizado para alimentar algunos equipos con que cuenta el sistema de distribución de agua de la municipalidad de la Antigua Guatemala, el medidor que se utilice deberá medir voltaje, corriente, potencia aparente, etc. Debe monitorearse la calidad de la energía realizando estudios de armónicos y analizando la potencia reactiva del sistema.

Los transformadores de corriente y de potencial se estarán utilizando para llevar las señales de corriente y de voltaje a niveles seguros de medición, en los medidores actuales se descarga un programa donde se ingresa las relaciones de transformación de los CT's y PT's, dichos medidores también pueden programarse desde su panel frontal ya que son totalmente digitales. En este sistema no se utilizará la corriente del CT para protección ya que se cuenta con los fusibles, si el sistema aumenta su carga entonces si deberá pensarse en la utilización de relevadores de sobrecorriente y otros tipos de protección.

Figura 19. Diagrama unifilar del sistema de generación.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE GENERACION, HIDROELECTRICA DE BOMBERO

CARLOS ANDRES NG HO

JUNIO DE 2005

5.4.6.2. Diagrama desarrollado del sistema de generación

En la figura 20 podemos observar las tres fases del sistema de generación. En cada fase es necesario medir la corriente, para lo cual se utilizan los CTs, también se utilizan un grupo de PTs para la medición de voltaje, los secundarios de los mismos se conectan al medidor. Si el medidor de energía es electrónico, en la configuración del mismo se deben introducir las relaciones de transformación de los CTs y PTs. Los medidores de energía electrónicos pueden ser utilizados con diversas conexiones eléctricas, lo cual debe indicársele en la configuración por medio de un software. La medición y análisis de armónicos, caídas de tensión y de corriente también pueden ser monitoreadas con un medidor de energía digital, todo con el objeto de mantener la calidad de la energía y alargar la vida útil de los elementos del sistema. Se puede observar el rectificador trifásico para utilizar en el caso de que se instale un banco de baterías ya que éste se debe recargar. En los diagramas eléctricos no se da mayor información de la fuente de corriente directa que servirá para crear el campo magnético en el generador, solamente se representa una fuente de corriente directa.

La conexión para el generador es una estrella aterrizada, esta conexión es la que se utiliza con más frecuencia por sus ventajas, por ejemplo, se tiene un punto fijo como nivel de referencia de voltaje.

Las alarmas que se representan en el diagrama son las cantidades que tienen mayor importancia y deben monitorearse, en el medidor se pueden programar dichas alarmas y utilizar las señales digitales que éste proporciona para abrir o cerrar los circuitos de protección. La figura 21 nos muestra el diseño del panel eléctrico en el cual se encontrarán los CTs y PTs, aunque anteriormente se mencionó que no se utilizarían PTs para medir la tensión se prevé la instalación de los mismos en caso de que el nivel de tensión se eleve. Los medidores actuales pueden realizar una representación de los fasores de voltaje y de corriente.

Figura 20. Diagrama eléctrico desarrollado del sistema de generación, central hidroeléctrica de bombeo.

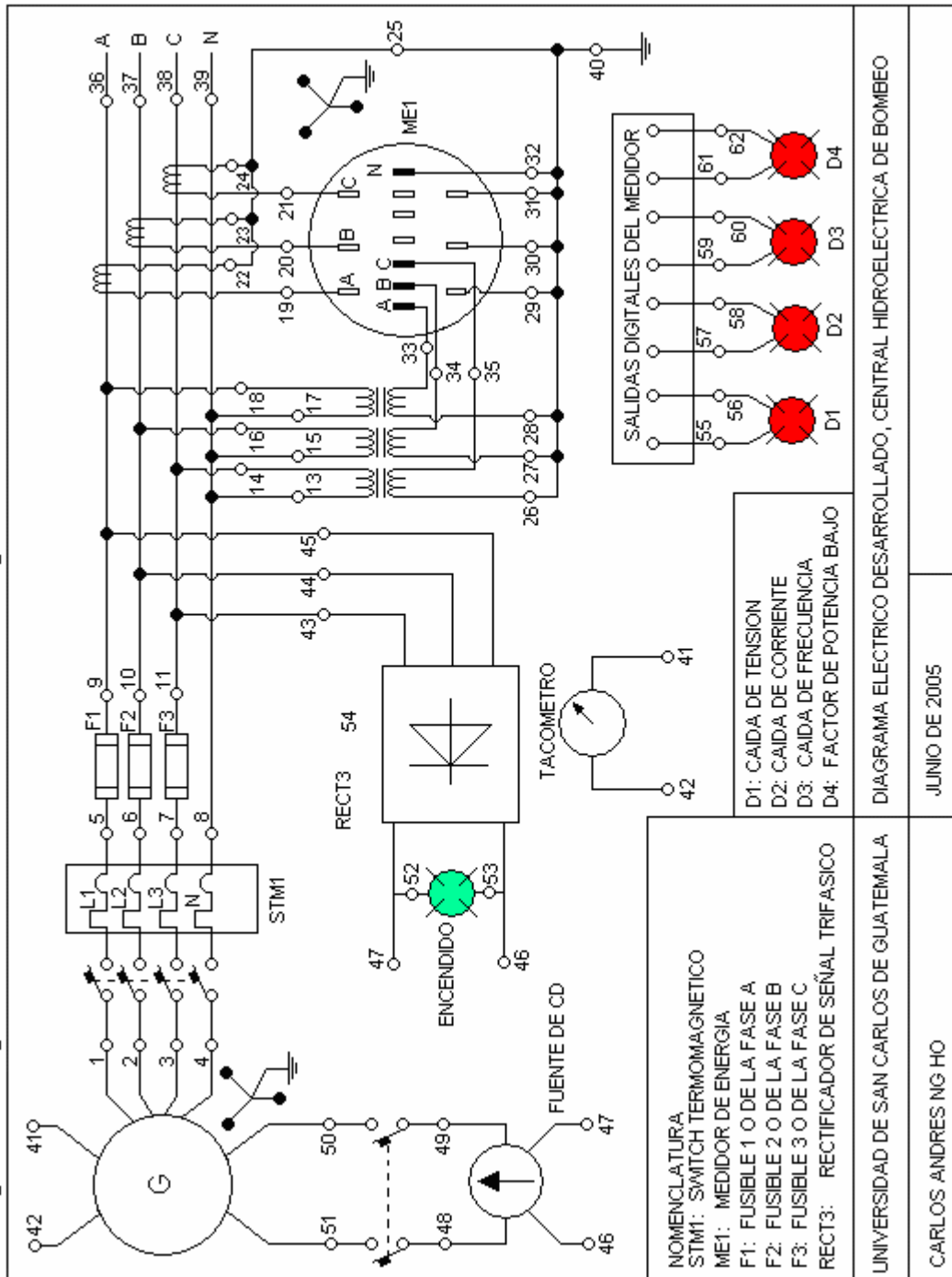
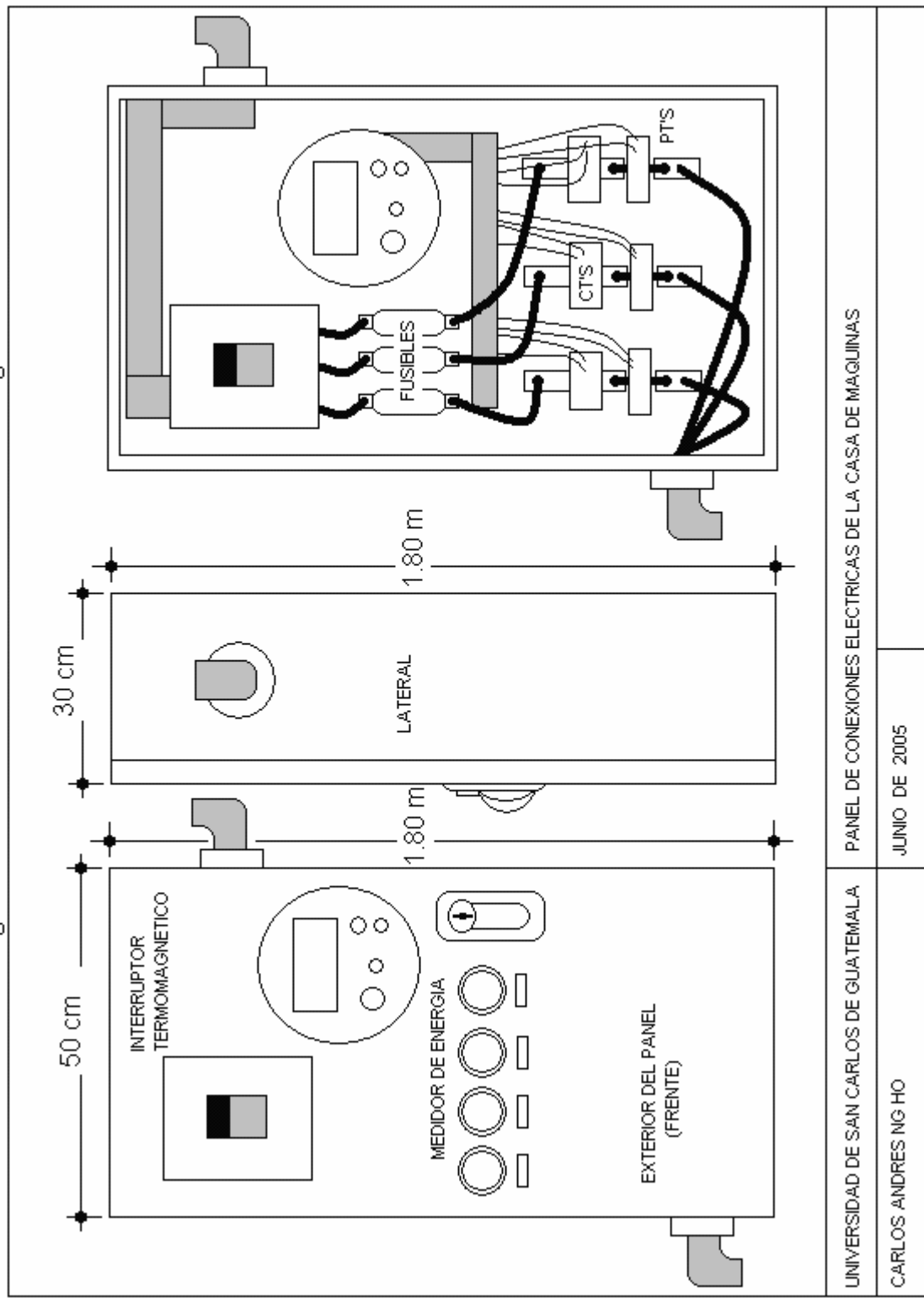


Figura 21. Panel de conexiones eléctricas del sistema de generación.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

PANEL DE CONEXIONES ELECTRICAS DE LA CASA DE MAQUINAS

CARLOS ANDRES NG HO

JUNIO DE 2005

5.4.6.3. Diagrama unifilar del sistema de regulación de velocidad de la turbina

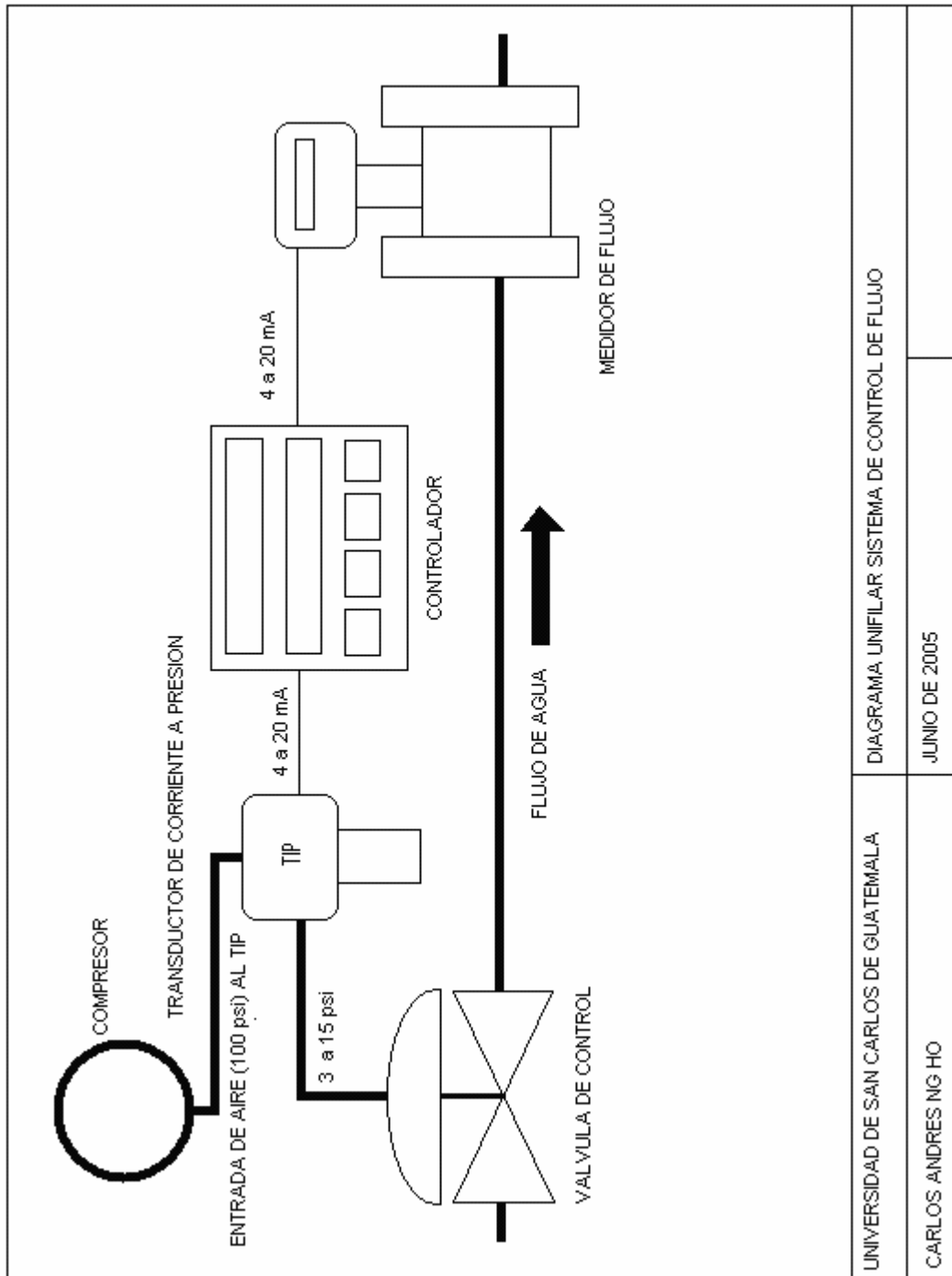
El flujo de líquido a través de la tubería debe ser una cantidad constante debido a que la turbina debe rotar a una velocidad angular constante, es por ello que debe implementarse un sistema de regulación similar al que se muestra en la figura 22. La medición de flujo se llevará a cabo con un transmisor de presión diferencial o con un medidor magnético de flujo. Luego se requiere de un controlador con entradas y salidas analógicas, el cual recibirá señales de corriente y proporcionará una señal de control al elemento final, que en este caso es una válvula neumática. La válvula requerirá de un sistema de conducción de aire para que el actuador pueda funcionar, debe ser de este tipo, ya que el flujo presentará variaciones debido al cambio en el volumen del depósito.

Los medidores de flujo basados en transmisores de presión diferencial realizan una medición de la caída de presión que se crea por medio de una placa de orificio o cualquier otro medio que produzca dicha caída de presión, el cual se inserta en la tubería. La medición de flujo que realizan estos transmisores se puede comprobar con la ecuación de Bernoulli. Un medidor de flujo de tipo magnético presentará una mayor precisión en la medición de flujo, es utilizado en muchas aplicaciones, pero el fluido debe ser conductivo ya que estos medidores están fabricados basándose en la ley de inducción de Faraday.

El controlador solamente es capaz de proporcionar una señal eléctrica, por lo general se utiliza una señal de 4 a 20 mA de corriente directa, también puede ser de 0 a 20 mA, entonces esta señal deberá utilizarse para generar una equivalente pero de tipo neumática ya que el elemento final de control es una válvula neumática. Se requiere que la válvula tenga una respuesta lineal a la señal que le proporciona el transductor de corriente a presión, se debe tener cuidado al seleccionar la válvula ya que si la respuesta de la misma no es lineal el sistema no regulará correctamente el flujo de agua.

Con la respuesta lineal de la válvula se evitarán cambios repentinos en la velocidad el fluido o lo que se denomina golpe de ariete. Los instrumentos que utilice el sistema deben calibrarse cada cierto tiempo debido a que pierden sus parámetros de funcionamiento con el uso, dichos parámetros son el span y el cero y deben calibrarse adecuadamente.

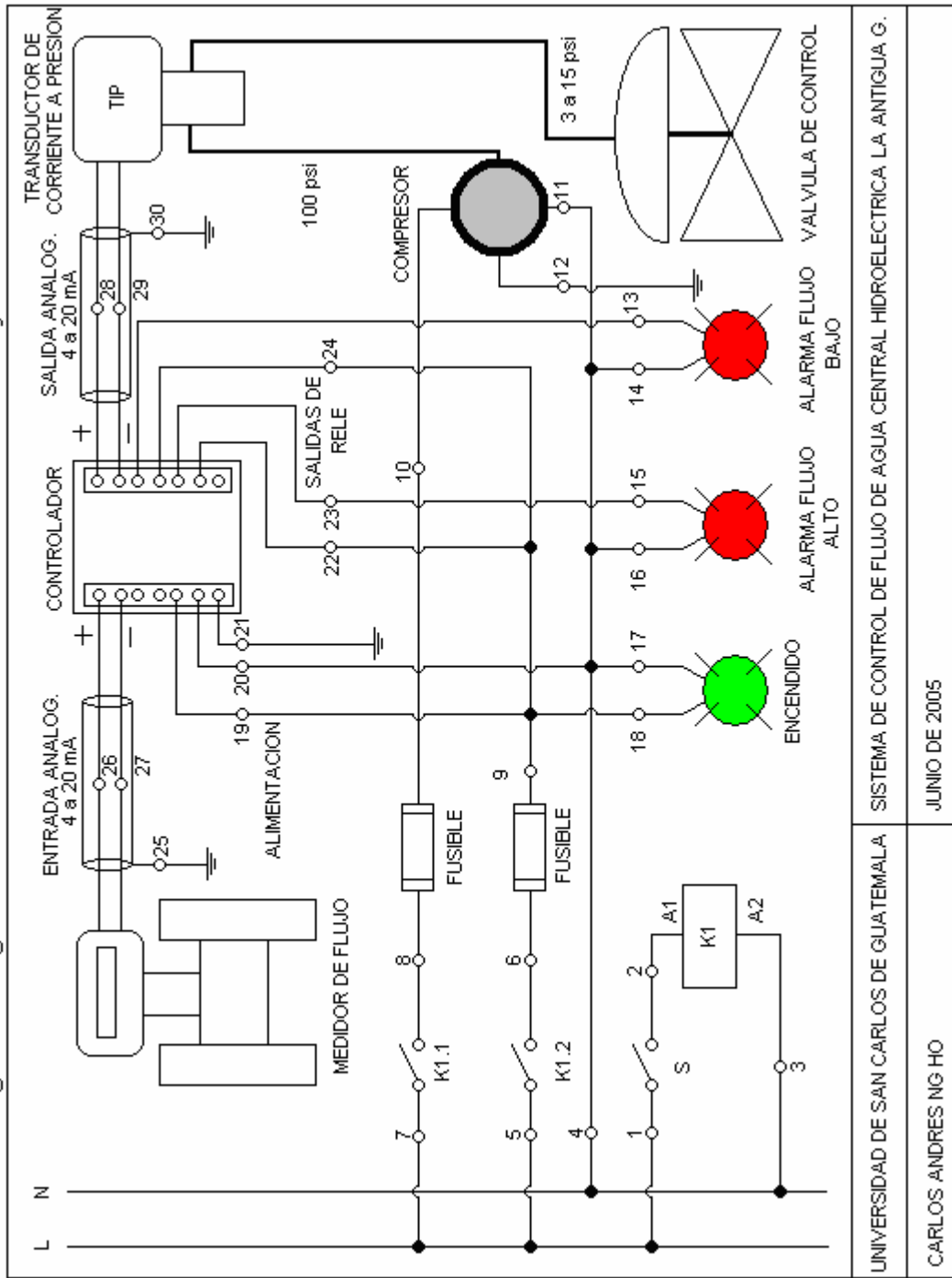
Figura 22. Diagrama unifilar del sistema de control de flujo.



5.4.6.4. Diagrama desarrollado del sistema de regulación de velocidad de la turbina

La figura 23 muestra el diagrama desarrollado del sistema de regulación de flujo de agua. Los sistemas de control industriales utilizan señales analógicas estándar, la que más se utiliza es la señal de 4 a 20 mA, pero pueden ser de otro rango de valores, este tipo de señal es la que utilizaremos en este sistema, puede observarse en el diagrama donde es que se utilizan. En lo que respecta a las señales neumáticas tenemos las de 3 a 15 psi que son muy utilizadas en los equipos. El controlador requiere de su fuente de alimentación, la cual puede ser corriente directa o alterna. En estos controladores pueden programarse alarmas, las cuales controlan relés y pueden ser utilizados para activar una alarma visual o auditiva; también se pueden realizar rampas para utilizarse en ciertas aplicaciones, pero lo más importante para este proyecto es que tienen la capacidad de realizar un control PID (proporcional - integral - derivativo). Los parámetros PID que se ingresan al controlador deben irse ajustando a cada aplicación. Cuando se utiliza una banda proporcional muy alta el controlador brinda una señal de salida de control muy estable, pero cuando se presenta un pico de desestabilización la señal tarda demasiado tiempo en volver a estabilizarse, entonces debe utilizarse una banda proporcional reducida. Se debe tener precaución al modificar la banda proporcional de la señal de salida, ya que ésta se puede presentar en porcentaje o en ganancia, las cuales son cantidades inversamente proporcionales. El setpoint del controlador es el valor del flujo en m^3/s que hemos calculado para tubería, ya que con esto se mantendrá constante la velocidad del chorro con que el agua choca contra las cucharas de la turbina hidráulica. En la actualidad los protocolos de comunicación más avanzados permiten que el control se lleve a cabo en los instrumentos de medición, con lo cual un controlador puede ser omitido, pero dichos instrumentos tienen un costo elevado.

Figura 23. Diagrama eléctrico desarrollado del sistema de control de flujo de la tubería.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

SISTEMA DE CONTROL DE FLUJO DE AGUA CENTRAL HIDROELECTRICA LA ANTIGUA G.

CARLOS ANDRES NG HO

JUNIO DE 2005

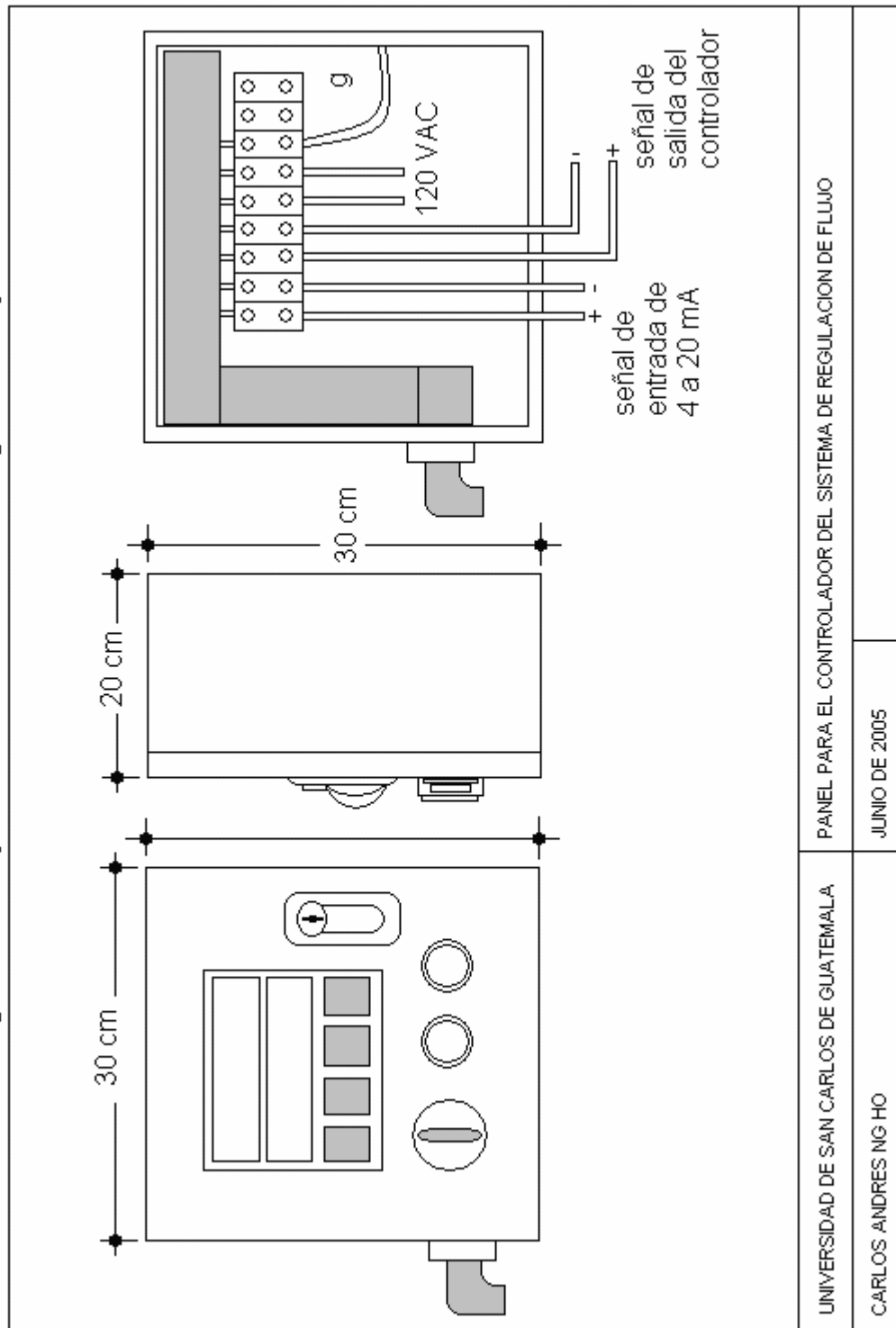
5.4.6.5. Diseño del panel eléctrico para el sistema de control de flujo

El panel a utilizar para instalar el controlador debe ser especificado de igual manera que el panel del sistema de generación con las normas contra humedad e intemperie (IP 66). El panel que se muestra contiene el controlador y una bornera donde se conectan las señales de entrada y salida al mismo, también puede observarse el cableado para alimentación de 120 Vac. El sistema debe estar aterrizado correctamente para evitar diferencias de potencial que puedan causar daños al sistema o a algún operador, el cable denominado g se conecta al panel para que éste esté debidamente aterrizado.

No se han calculado las protecciones para el sistema de regulación, pero por lo regular los controladores están diseñados para soportar momentáneamente corrientes no mayores a 85 mA, con lo cual se tiene una referencia para calcular los dispositivos de protección, en este caso se utilizarán fusibles. El cable que se utilice debe ser cable de instrumentación, este es un cable que tiene revestimiento, el cual se aterriza, con esto se evita que las señales que se envían a través de ellos interfieran entre sí.

Las medidas del panel son de 30 x 30 x 20 cm, es bastante pequeño, el controlador a utilizar tendrá una medida de ¼ DIN o menor por lo que no es necesario un panel de mayor tamaño que el propuesto. Como puede observarse solamente se tiene un interruptor para arrancar el sistema de regulación de flujo. Al lado del interruptor se tienen dos indicadores, uno de ellos indicará que el sistema está encendido y el otro indicará la reducción del flujo de agua, pueden agregarse más señales visuales ya que este diseño es solamente una propuesta. La señal neumática proviene de un compresor, las conexiones del mismo no se incluyen en el diagrama eléctrico, pero éste debe funcionar cuando el sistema de generación esté trabajando ya que la regulación del flujo se debe realizar en todo el proceso de generación de energía.

Figura 24. Panel para el controlador del sistema de regulación de flujo.



CONCLUSIONES

1. Las estructuras del sistema de distribución de agua potable de la Municipalidad de la Antigua Guatemala, deben ser modificadas en varias áreas para poder desarrollar el proyecto de generación de energía eléctrica por medio de la hidroeléctrica de bombeo; los beneficios son a largo plazo, ya que la implementación de este tipo de centrales hidroeléctricas, hará que los recursos naturales sean utilizados con más eficiencia y la generación de energía disminuirá sus costos.
2. Si el sistema de regulación de velocidad de la turbina no fuese implementado, la velocidad del chorro de agua que choca contra las cucharas de la turbina presentaría variaciones, por lo tanto, la potencia transmitida al eje no sería constante, además, la frecuencia de la señal de tensión (60 Hz) tampoco lo sería, es por ello que debe regularse la velocidad de la turbina. La regulación de la velocidad de la turbina, utilizando un control PID para regular el flujo de agua en la tubería resulta ser bastante efectivo, y en la actualidad muchos controladores permiten la implementación de un algoritmo PID al lazo de control.
3. Los cálculos realizados indican que debe utilizarse una turbina Pelton, aunque estas turbinas hidráulicas están diseñadas para operar a alturas superiores a los 150 metros y la diferencia de altura entre los depósitos en este proyecto es de un poco más de 25 metros; las tuberías que se utilizarán hacen que la velocidad específica que adquiere la misma tenga un valor bajo. Debido a que este nuevo sistema debe adaptarse a las estructuras existentes, sólo nos podemos limitar a reducir el diámetro de la tubería para que la velocidad del chorro aumente, con lo que el diámetro del rodete y el de las cucharas también se reducen.

RECOMENDACIONES

1. Los recursos naturales cada día son más limitados y la búsqueda de nuevas formas de energía “saludables” son necesarias. Los sistemas de generación de energía deben tratar de conservar el medio ambiente y aprovechar al máximo los recursos, lo cual es una tarea difícil pero cada vez más necesaria.
2. La cantidad de energía que se genere puede ser pequeña, pero ésta debe tener calidad y no debe introducir distorsiones al sistema que alimenta, es por ello que un sistema de monitoreo de calidad de potencia debe implementarse. Actualmente, los medidores de energía ya no solamente están destinados a esta tarea, ahora son capaces de presentar gráficamente los valores de los fasores de voltaje y corriente, y de medir distorsiones.
3. En los sistemas de generación de gran escala no pueden utilizarse válvulas que regulen el paso de agua, ya que la presión generada por el agua a alturas muy grandes no puede ser controlada por una válvula. En este diseño se debe seleccionar la válvula tomando en cuenta las presiones de entrada y de salida, teniendo en cuenta que cuando ésta esté totalmente cerrada en su lado de baja presión solamente estará presente la presión atmosférica, la cual lógicamente es mucho menor a la presión ejercida por el agua.
4. Se consideró la utilización de un generador de corriente continua debido a que se estará aprovechando la energía mecánica de la turbina, si se opta por un banco de baterías, éste significa un mayor costo a largo plazo ya que debe darse mantenimiento al sistema de rectificación de señal y al banco en sí; las dos formas de obtención de corriente directa tienen sus ventajas y desventajas, entonces debe optarse por una combinación de ambas o darle prioridad al factor económico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Franzini, Joseph B.; E. John Finnemore. **Mecánica de Fluidos con aplicaciones en Ingeniería.** Novena Edición. España: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U., 1999. 503 pp.
2. Fitzgerald, A. E; Charles Kingsley Jr.; Alexander Kusko. **Teoría y análisis de las máquinas eléctricas.** Segunda Edición. España: Editorial Hispano Europea. 1980.
3. Martin, José Raúl. **Diseño de subestaciones eléctricas.** Segunda Edición. México: Editorial McGraw Hill Interamericana de México, S.A. de C.V., 1992. 505 pp.
4. Resnick, Robert; David Halliday. **Física parte 1** Cuarta Impresión de la tercera edición. México: Compañía Editorial Continental, S.A. 1982. 636 pp.
5. Gómez Navarro, José Luis; Aracil Segura, José Juan. **Saltos de agua y presas de embalse** (primer tomo). Tercera edición. Madrid: alameda, 1958; pp. 1022 – 1026.

