



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

## **ESTUDIO Y ANÁLISIS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA DE ZUNIL**

**Romeo Alfonso Pacheco Gramajo**

Asesorado por el Ing. Benedicto Monroy Mérida

Guatemala, febrero de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO Y ANÁLISIS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA  
HIDROELÉCTRICA DE ZUNIL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**ROMEO ALFONSO PACHECO GRAMAJO**  
ASESORADO POR EL ING. BENEDICTO MONROY MÉRIDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO     | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos      |
| VOCAL I    | Inga. Glenda Patricia García Soria   |
| VOCAL II   | Inga. Alba Maritza Guerrero de Lòpez |
| VOCAL III  | Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón    |
| VOCAL IV   | Br. José Milton De León Bran         |
| VOCAL V    | Br. Isaac Sultán Mejía               |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas     |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

|            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| DECANO     | Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos    |
| EXAMINADOR | Ing. Fredy Muricio Monroy Peralta  |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma |
| EXAMINADOR | Ing. Luis Eduardo Coronado Noj     |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas   |

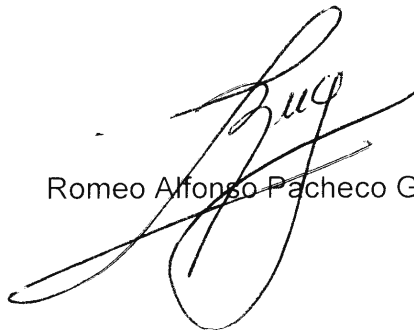
## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

### ESTUDIO Y ANÁLISIS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PLANTA HIDROELÉCTRICA DE ZUNIL,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el 28 de marzo de 2007.

Romeo Alfonso Pacheco Gramajo

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Romeo', with a large, stylized flourish extending downwards and to the left.

Quetzaltenango, 28 de septiembre del 2,007

Ing. Frody Mauricio Monroy Peralta  
Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería, USAC  
Ciudad de Guatemala

Estimado ingeniero Monroy Peralta:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que he **asesorado** el trabajo de graduación del bachiller **Romeo Alfonso Pacheco Gramajo**, con carnet **8630948**, titulado **ESTUDIO Y ANÁLISIS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA DE ZUNIL**.

Después de haber revisado y corregido dicho trabajo, a mi consideración llena los requisitos para su **aprobación final**.

Sin nada más por el momento, me suscribo de usted.

Muy cordialmente,

  
Ing. Benedicto Monroy Mérida  
Asesor

**Benedicto Monroy Mérida**  
Ingeniero Electricista  
Colegiado No. 1406

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE EPS

Guatemala, 26 de noviembre de 2008  
REF.EPS. D. 1060.11.08

Inga. Norma Helena Sarmiento Zucchi de Sarmiento  
Directora Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Escuela Ingeniería Sarmiento Zucchi.

Por este medio atestamos lo siguiente: que como Supervisor de la Práctica del Trabajo Profesional Supervinado (T.P.S.), del estudiante universitario **ROMEO ALFONSO PACHECO GRAMAJO** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 8630948, procedí a revisar el informe final, cuyo título es "ESTUDIO Y ANÁLISIS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA DE ZUNIL".

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me despido sus atentos.

Atentamente,

*"Id y Encomend a Todos"*

Ing. Tiberio Estuardo Sarmiento Zucchi  
Supervisor de T.P.S.  
Área de Ingeniería Mecánica



c.c. Archivo  
EESZ/21

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 26 de noviembre de 2008  
REF. TPS. D.1060.11.08

Ing. Julio César Campos Pizar  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Presente:

Tutorado Ingeniero Campos Pizar:

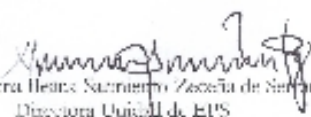
Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la petición del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado "ESTUDIO Y ANÁLISIS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA DE ZUNIL" que fue desarrollado por el estudiante universitario, **RÓMEO ALFONSO PACHECO GRAMAJO** quien fue fehacientemente asesorado por el Ing. Beaudilio Morcos Mérida y supervisado por el Ingeniero Edwin Estuardo Sotocho Zapate.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trámite y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor y del Supervisor de EPS, en mi calidad de Director, aprecio su conformidad solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

*"Fid y Lealtad a Dios"*

  
Ingen. Norma Beatriz Nacimiento Zaccara de Sotomayor  
Directora Unidad de EPS

NISZ/cn



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación de la Directora de la Unidad del Ejercicio Profesional Supervisado, al trabajo de graduación ESTUDIO Y ANÁLISIS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA DE ZUNIL, del estudiante Ramiro Alfonso Pacheco Guitiérrez, procede a la autorización del mismo.

YO ENSEÑARÉ A TODOS

Ing. Julio César Campos Ruiz

DIRECTOR



Guatemala, noviembre de 2008.

Señalé



Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.022.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO Y ANÁLISIS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA DE ZUNIL**, presentado por el estudiante universitario **Romeo Alfonso Pacheco Gramajo**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRIMASE.

  
Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
DECANO

Guatemala, febrero de 2009.



/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

Dios: Creador del Universo y fuente inagotable de sabiduría.

Mis Padres: León Ramiro Pacheco Gramajo  
Alicia Esperanza Gramajo Baides de Pacheco

Mis hermanos: Werner Salvador, Carlos Ramiro, Aida Abigail y  
Jorge Alberto

Mis sobrinos: Andrea María, Ana Isabel, Pablo Werner, Patrick,  
Carlos Francois, Werner Iván, Jaquelin Roxana,  
Yosselin y Barbara Cecilia.

Toda mi familia

Mis amigos

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**DIOS**

Por permitirme la vida y alcanzar esta meta.

La Empresa Eléctrica Municipal de Quetzaltenango

Por brindarme su ayuda.

La Facultad de Ingeniería

La Universidad de San Carlos de Guatemala

## ÍNDICE GENERAL

|                         |      |
|-------------------------|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | V    |
| GLOSARIO                | VII  |
| RESUMEN                 | XI   |
| OBJETIVOS               | XIII |
| INTRODUCCIÓN            | XV   |

### 1. GENERALIDADES

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Descripción de la Empresa Eléctrica Municipal en Quetzaltenango EEMQ..... | 1  |
| 1.2. Meta y objetivo de la EEMQ .....  | 1  |
| 1.3. Estructura básica de la EEMQ.....   | 2  |
| 1.4. Descripción general de la planta.....                                     | 2  |
| 1.5. Antecedentes de la planta hidroeléctrica de Zunil.....                    | 3  |
| 1.6. Funcionamiento teórico.....   | 4  |
| 1.7. Funcionamiento real.....  | 21 |
| 1.8. Mantenimiento propuesto por el fabricante.....                            | 41 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| <b>2.</b> | <b>FASE DE INVESTIGACIÓN</b>  |    |
| 2.1       | Descripción actual de los sistemas .....  | 43 |
| 2.1.1     | Hidráulico.....   | 43 |
| 2.1.2     | Mecánico.....   | 44 |
| 2.1.3     | Eléctrico .....   | 44 |
| 2.1.4     | Administrativo .....  | 45 |
| 2.2       | Establecimiento de las secuencias de funcionamiento<br>de la planta .....   | 49 |
| 2.3       | Diagnóstico de cada uno de los sistemas.....  | 50 |
| <br>      |   |    |
| <b>3.</b> | <b>FASE TÉCNICO–PROFESIONAL</b>   |    |
| 3.1       | La turbina tipo Francis.....  | 53 |
| 3.2       | El distribuidor .....   | 54 |
| 3.3       | Caracterización del equipo existente .....  | 55 |
| 3.2.1.    | Ficha técnica .....   | 55 |
| 3.3.2     | Características del Generador .....   | 55 |
| 3.4       | Especificación del equipo a sustituirse en la instalación<br><br>existente y dimensiones de los componentes del nuevo<br><br>equipo mecánico..... | 56 |
| 3.4.1     | Por estas razones se propone lo siguiente .....   | 56 |
| 3.5.      | Dimensionamiento de los equipos .....   | 57 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.6.   | Especificación general del equipo electromecánico..... | 59 |
| 3.6.1. | Turbina Hidráulica .....                               | 60 |
| 3.6.2. | Sistemas agregados a la Turbina .....                  | 60 |
| 3.6.3. | Generador.....   | 60 |
| 3.7    | Equipo nuevo a instalar.....                           | 62 |
| 3.7.1. | Red de distribución .....                              | 62 |
| 3.7.2. | Red de distribución 13. 8 kV .....                     | 62 |
| 3.7.3. | Subestación de entrada .....                           | 62 |
| 3.7.4. | Casa de máquinas .....                                 | 63 |
| 3.8.   | Diagrama de flujo .....                                | 65 |
| 3.9.   | Organigrama propuesto .....                            | 66 |
|        | <b>CONCLUSIONES</b> .....                              | 67 |
|        | <b>RECOMENDACIONES</b> .....                           | 69 |
|        | <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....                              | 71 |



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| 1. Rodete de Turbina Francis                             | 5  |
| 2. Un rodete de 28,000 hp (cerca de 21,00 KW)            | 6  |
| 3. Turbinas Hidráulicas                                  | 10 |
| 4. Cavitación en un canjilón                             | 19 |
| 5. Dique de la Planta                                    | 22 |
| 6. Desarenador   | 23 |
| 7. Compuerta de entrada al desarenador                   | 23 |
| 8. Vista del desarenador                                 | 24 |
| 9. Canal desarenador                                     | 24 |
| 10. Reloj de entrada a la toma                           | 25 |
| 11. Vista de la toma, sólo que llena y en funcionamiento | 25 |
| 12. Muro de inicio                                       | 26 |
| 13. Tubería de presión                                   | 26 |
| 14. Otra vista de la tubería de presión                  | 27 |
| 15. Final de la tubería de presión                       | 27 |
| 16. Caracol de Turbina Francis                           | 28 |
| 17. Salida de agua de la Turbina Francis                 | 28 |
| 18. Excitatriz del generador                             | 29 |
| 19. El regulador de velocidad                            | 30 |
| 20. Frecuencímetro                                       | 31 |
| 21. Palanca de control del turbina                       | 32 |
| 22. Chumacera principal                                  | 32 |
| 23. Generador  | 33 |
| 24. Volante  | 34 |
| 25. Tablero del generador                                | 35 |
| 26. Rodete de la turbina                                 | 37 |



|  |    |
|--|----|
| 27. Paletas de la turbina                      | 37 |
| 28. El antiguo banco de transformación         | 38 |
| 29. La salida eléctrica del generador          | 38 |
| 30. Nuevo banco de transformación              | 39 |
| 31. Casa de maquina                            | 40 |
| 32. Salida final del canal                     | 41 |
| 33. Organigrama actual                         | 48 |
| 34. Pérdida de sección del alabe de la turbina | 52 |
| 35. Distribuidor                               | 53 |
| 36. Diagrama de flujo                          | 64 |
| 37. Organigrama propuesto                      | 65 |

## GLOSARIO

|                    |   |
|--------------------|---|
| <b>Azolven</b>     | Deposición de sedimentos transportados por el agua, principalmente en lagos, depósitos, canales o diques. estos depósitos están formados por materiales sedimentarios sin importar su origen. |
| <b>Carcaza</b>     | La parte que cubre ya sea la turbina o el generador.  |
| <b>Chimenea de</b> | Una tubería vertical que se conecta a la tubería de presión.  |
| <b>Escape</b>      | Ya sea para sacar burbujas o para disipar la energía de un golpe de ariete.   |
| <b>Desarenador</b> | Es un canal, generalmente amplio, en donde el agua pierde velocidad y de esta manera los sólidos que lleve tienden a asentar en el fondo del mismo.   |

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b>Dique</b>                     | Lugar en donde se almacena el agua, río arriba, antes de la toma.   |
| <b>Eficiencia</b>                | Es la relación entre la energía que se produce al final de la conversión en comparación con la energía que entra originalmente a la planta. |
| <b>Excitatriz</b>                | Es un generador eléctrico de corriente directa que se utiliza para crear campo magnético en el centro del generador de corriente alterna.   |
| <b>Generador</b>                 | El conversor de la energía de movimiento en energía eléctrica.  |
| <b>Golpe de ariete</b>           | Onda de presión que se produce por un cierre brusco de una compuerta y parada de la corriente agua, mediante una vibración ruidosa.         |
| <b>Planta<br/>Hidroeléctrica</b> | En general, es aquella en que se convierte la energía de movimiento y caída de un río es corriente eléctrica                                |

aprovechable para la industria, iluminación, fuerza motriz, etc.

**Rodete**

La parte giratoria de la turbina.

**Tubería de**

Esta se inicia en la toma y termina inmediatamente

**Presión**

antes de la turbina y es en donde el agua tiene su mayor caída. Esta construida de acero para aguantar las fuertes presiones.

**Turbina**

Es en donde se convierte la energía potencial o cinética de agua, en energía de movimiento angular de un eje.

**Turbogenerador**

Es el combinado de tubería y generador. En la actualidad es muy común que los vendan juntos.



## RESUMEN

La mayor razón por la cual se desarrolló el análisis de la optimización de la planta hidroeléctrica de Zunil es generar energía eléctrica más limpia y aprovechar el potencial hidráulico que cuenta la región.

Es una época en el cual el sobrecalentamiento global y el deterioro al medio ambiente es una realidad. Razón por la cual esta es la mejor forma de generar energía eléctrica sin daños al medio ambiente.

El principal problema encontrado es el desgaste del rodete de la turbina Francis que se debe principalmente a la cavitación y no a la abrasión como comúnmente se ha creído. Componen el conjunto de causas que desgastan el material de los rodetes de la turbina al grado que los alabes sufren pérdidas de sección.

El presente trabajo de Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.) se basó en el proyecto de diseño de remodelación. Planteamos dos opciones para las sustituciones equipo mecánico existente.

La primera es la sustitución existente y conversando la misma instalación de tubería de presión con el confinado final con codo a 90 grados.

La segunda opción es la ubicación de la casa máquinas, eliminando el codo a 90 y elevando la cabeza hidráulica de la tubería.

La otra solución viable es optimizar al máximo el emplazamiento existente, homologando la sección del canal, ya que ésta es una limitación para la obtención de una uniformidad del caudal de alimentación.

Con la visión de mejorar el aspecto administrativo, a fin de garantizar la optimización de la planta.

## OBJETIVOS

### General:

Implementar todas las acciones posibles y realistas que estén dentro de nuestra esfera de acción y dentro del alcance real de nuestros recursos financieros para que esta planta hidrogeneradora se le pueda llevar de nuevo a su potencia original y de manera adicional se le puede incrementar la generación, mediante el establecimiento de las medidas administrativas que permiten detectar y manejar de aquí en adelante estos decrementos en la producción de energía de manera tal que la planta se mantenga generando lo mas cercano a su potencia original en el medio siglo por venir.

### Específicos:

1. Definir un diseño realista y de baja inversión para que la planta llegue a generar a los 1.4 MW. A decir 0.2 MV arriba de la potencia original, lo cual es posible debido a que:
  - o Se puede mejorar el diseño hidráulico entre otras cosas se puede obtener cerca de un 8% de mayor caída.
  - o Las turbinas hidráulicas actuales pueden ser mas eficientes que las de hace medio siglo. Los diseños son mas eficientes ya que en la actualidad se utiliza unidades turbogeneradoras de eje vertical que permite un mejor uso de la caída en términos reales y en nuestro caso especifico, la altura actual de la turbina esta cerca de los 3 metros que en una buena proporción se restan a la caída efectiva al utilizar eje horizontal, con eje vertical se van a estar utilizando un poco mas de 2 metros esto es cerca de un 15% que se añade a la caída efectiva.



- Los generadores eléctricos actuales son ligeramente mas eficientes que los de hace medio siglo. En buena parte es debido al desarrollo de mejores materiales ferro magnéticos y al uso de semiconductores.
- Los primeros hacen que hoy se utilice menos masa rodante y, en consecuencia se desperdicie menos energía cinética de rotación.
- Los segundos hacen que no se necesite de excitatriz especifica y separada de corriente alterna, sino que de la misma salida del generador de corriente alterna, luego de rectificarse mediante semiconductores y de ajustarse a las necesidades de generación se devuelve al campo del mismo generador esto elimina el uso de colectores y de todo el chispeo y corrimiento de campos que les era usuales a estos.

## INTRODUCCIÓN

La planta de Zunil como aquí le llamaremos a la planta Hidroeléctrica de Zunil de la Empresa Eléctrica Municipal de Quetzaltenango es una planta relativamente pequeña, que originalmente en julio de 1957 cuando se le inaugurara podía llegar a generar hasta 1.2 MVA posiblemente con esto era suficiente para llenar la demanda de la ciudad de Quetzaltenango y los municipios circunvecinos tales como Almolonga, Zunil y Cantel.

En la actualidad, medio siglo después, muchas de las situaciones han cambiado de manera notable: (1) en la actualidad la planta lo que genera esta ahora mismo en las cercanías de los 30 MVA y tiene un crecimiento muy cercano al 7% anual. Para dar un dato de magnitud comparable el crecimiento del sistema Eléctrico Nacional esta en las cercanías del 2% anual.

Para dar una mejor idea del problema que posteriormente se plantea esta planta solo cubre, en el punto máximo, cerca de uno de cada 60 vatios que la EEMQ comercializa y que en promedio esto esta entre 1 de cada 25 ó 30 vatios.

Esto nos deja libre ya que casi cualquier energía de la EEMQ genere puede comercializar sin mayor problema.

Por otro lado, esta planta a lo largo de todo este medio siglo, ha sido confiable y en contadas ocasiones se le ha tenido fuera de servicio, esto, en caso de falla del Sistema Eléctrico Nacional, ya que tiene una red que aunque pequeña pertinentes, continuar prestando servicio a los servicios de emergencia.

Uno de los puntos si no el principal de este estudio es la búsqueda y el encuentro de las razones por las que de manera y otra esta planta ha ido bajando su producción cuando toda la lógica podría apuntar en el sentido opuesto. Hay que hacer notar y establecer el propósito, en todo caso, es el de ayudar a que la solución sea benéfica para la mayoría de los actualmente involucrados.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Descripción de la Empresa Eléctrica Municipal en Quetzaltenango

#### **EEMQ:**

Esta empresa se fundó, a finales del siglo antepasado, en primer lugar, era una empresa privada y una de las primeras del país en este campo específico. Luego, al final de la Primera Guerra Mundial, debido a ser un bien alemán, el Gobierno de Guatemala la confiscó y unos meses después se le otorgó en propiedad a la Municipalidad de Quetzaltenango.

Es que la Empresa sí es un ente, con identidad y personería propia, separado de la Municipalidad de Quetzaltenango aunque pertenezca a ésta.

En la actualidad y en los últimos 20 años, ha ido perdiendo cada vez más su autonomía y se ha tenido una mayor intervención directa por parte de algunas concejalías, además que en los últimos dos períodos, el alcalde no ha fungido como gerente, que es como el organigrama lo estipula. Con lo anterior, se le ha venido aumentando las restricciones administrativas y la aleatoriedad en el manejo de la misma.

### 1.2. Meta y objetivo de la EEMQ:

Aunque tanto la meta como el objetivo no se han plasmado de manera clara y precisa como tales, los mismos en la actualidad son los siguientes:

**Meta:** ser una empresa que preste un buen servicio eléctrico a un buen precio.

**Objetivo:** tener una expansión tanto, al municipio de Quetzaltenango como a los circunvecinos para tener mayor

cobertura, que permita un mayor ingreso para los propietarios de la misma.

### **1.3. Estructura básica de la EEMQ:**

En la cima del organigrama se encuentra el Consejo Municipal de la ciudad de Quetzaltenango, luego viene, el Alcalde que funge como Gerente de la EEMQ, posteriormente el Gerente Municipal, de último la Dirección Administrativa y Financiera junto con la Coordinación Técnica.

O sea que, los niveles desde el Consejo hasta el del Gerente Municipal, se encuentran físicamente en el Palacio Municipal, los otros niveles, la EEMQ misma, ya se encuentra físicamente en el Centro Comercial Municipal.

La EEMQ y los niveles de la Dirección Administrativa y de la Coordinación Técnica son lo mismo.

La empresa cuenta con una planilla de personal de 130 miembros, de los cuales 30 están en la Planta de Zunil.

### **1.4. Descripción general de la planta:**

Se encuentra en una finca que se sitúa en el municipio de Zunil, en la aldea Chicovix, carretera Quetzaltenango a El Zarco atraviesa a la finca original.

Esta planta cuando se le inauguró en julio de 1957, hace exactamente medio siglo, producía hasta 1.2 MW. Inicialmente y por cerca de 40 años trabajó utilizando normas eléctricas europeas, es esa la razón de que la línea que originalmente llevaba la energía hacia la ciudad de Quetzaltenango utilizaba 30,000 voltios. Como veremos más adelante, esto se le tuvo que cambiar y ahora se utiliza

la norma estadounidense, los 13,200 voltios, para utilizar la energía con mayor facilidad, debido a que en el mercado local se encuentra con mayor facilidad los transformadores, herrajes, etc. para este voltaje.

### **1.5. Antecedentes de la planta hidroeléctrica de Zunil.**

La mayor parte de antecedentes de esta planta ya se han visto en la Introducción de este trabajo de Graduación.

Quizá sea necesario añadir que debido a su importancia histórica ya que si no la fue la primera fue una de las primeras en el país y, por otro lado, definitivamente la ciudad de Quetzaltenango fue la primera ciudad en Centroamérica que tuvo alumbrado público el Palacio Municipal, el Parque Central y la casa de la familia Aparicio, cuya energía se derivó de esta planta.

Con este dato se puede ver que la importancia histórica de la planta va mucho más allá de su importancia generadora, ya que ésta es relativamente muy pequeña, sin embargo, a pesar de lo pequeño, esto no le quita que puede dar un ingreso nada despreciable cercano a los Q7 millones al año. Que, por otro lado, debido al estado no óptimo de la misma, sólo ha estado en las cercanías de los Q2 millones al año; lo que nos da una pérdida financiera cercana a los Q5 millones anuales.

## 1.6 Funcionamiento teórico

### Componente mecánico:

#### Turbina hidráulica

La **turbina hidráulica** es un mecanismo rotativo que toma la energía del agua en movimiento y la convierte en energía mecánica en un eje.

Las turbinas hidráulicas se desarrollaron en el siglo diecinueve y se les utilizó ampliamente en la electricidad industrial antes de las redes eléctricas. Ahora, con mayor frecuencia, se les usa en generación de potencia eléctrica.

#### El remolino

Las ruedas hidráulicas se les han utilizado por miles de años en potencia industrial. Su principal dificultad es su tamaño, el que limita la velocidad de flujo y la caída que se quiere utilizar.

La migración de las ruedas de agua hacia las modernas turbinas tomó cerca de un siglo. El desarrollo ocurrió durante la Revolución Industrial, en donde se utilizó los principios y métodos científicos. También se usó un extensor de nuevos materiales y métodos de fabricación que se habían desarrollado para aquel tiempo.

La palabra *turbina* la acuñó el ingeniero francés Claude Bourdin, a principios del siglo XIX y se deriva de la palabra latina para “remolino” o “vórtice”. La diferencia principal entre las primeras turbinas hidráulicas y las ruedas de agua es un componente de remolino del agua que pasa la energía hacia un rotor en movimiento giratorio. Este componente adicional de movimiento es el que ha

permitido que las turbinas sean de menor tamaño que las ruedas de agua para la misma potencia. Las turbinas puede procesar más agua al girar más rápido y pueden manejar caídas mucho más grandes. Posteriormente, se desarrolló las turbinas de impulso, las que no utilizan remolino.

**Historia:** El rodete de una turbina Francis, de cerca de un millón de caballos de potencia, en la presa del Grand Coulee, tal como se muestra en la figura 1.

**Figura 1. Rodete de Turbina Francis**



Aun rodete de turbina Francis, de cerca de un millón de HP, cerca de 750 megavatios, cuando se le instalara en la presa del Grand Coulee, EEUU.



**Figura 2. Un rodete de 28,000 hp (cerca de 21,000 KW)**



Juan Andrés Segner, desarrolló una turbina hidráulica a reacción a mediados del siglo de 1700. Era de eje horizontal y fue una de las precursoras de las turbinas hidráulicas modernas. Era una máquina muy simple que aún hoy día se le produce para su uso en pequeñas hidráulicas. Segner trabajó junto con Euler en algunas de las primeras teorías matemáticas para el diseño de turbinas. En 1820, Jean Victor Poncelet desarrolló una turbina con flujo hacia adentro.

En 1826, Benoit Fourneyron desarrolló una turbina con un flujo hacia fuera. Ésta fue una máquina eficiente (~80%) que hacía pasar el agua por un rodete con hojas curvadas en una dimensión. La salida estacionaria también tenía las guías curvadas.

En 1844, Uriah A. Boyden desarrolló una turbina de flujo hacia afuera que mejoraba el funcionamiento de la turbina de Fourneyron. La forma de su rodete era similar a las de la turbina Francis.

En 1849, James B. Francis mejoró la turbina a reacción, con flujo hacia adentro hasta cerca de un 90% eficiencia. También, hizo pruebas sofisticadas y desarrolló los métodos de ingeniería para el diseño de turbinas hidráulicas. Por él se nombró Francis a la turbina de este nombre, es la primera turbina hidráulica moderna. Aún es la de más amplio uso en el mundo.

Las turbinas hidráulicas de flujo hacia adentro tienen un mejor arreglo mecánico y todas las turbinas hidráulicas a reacción modernas son de este diseño. También, a manera que la masa de agua en remolino avance hacia una rotación más apretada, va a tratar de aumentar su velocidad para conservar la energía. Esta propiedad actúa sobre el rodete, además del peso del agua que cae y del movimiento de remolino. La presión del agua cae a cero a medida que pasa por las hojas de la turbina y se deshace de su energía.

Alrededor de 1890, se inventó la chumacera, que ahora se le utiliza universalmente para cargar los pesados rotores de turbina hidráulica. Para el 2,002, las chumaceras aparentan tener un tiempo medio entre fallas de más de 1,300 años.

Alrededor de 1913, Víctor Kaplan creó la turbina Kaplan, una máquina del tipo hélice. Fue una evolución de la turbina Francis pero revolucionó la capacidad de desarrollar proyectos hidráulicos de baja caída.

### **Un nuevo concepto**

Todas las máquinas hidráulicas comunes hasta fines del siglo XIX (incluyendo las ruedas hidráulicas) fueron máquinas de reacción; la presión

de la caída de agua actúa en la máquina y produce trabajo. La turbina a reacción necesita contener en su totalidad el agua durante la transferencia de energía.

En 1866, el molinero californiano Samuel Knight inventó una máquina que funcionaba con un concepto totalmente diferente. Inspirado en los sistemas de chorro a alta presión que se usaban en la minería hidráulica en los campos auríferos, Knight desarrolló una rueda con canchilones que capturaba la energía del chorro libre, la que convierte la caída alta (cientos de pies verticales en una tubería de presión) de agua en energía cinética. A esta turbina se le llama turbina de impulso o turbina tangencial. La velocidad del agua, aproximadamente el doble de la velocidad de periferia de canchilones, da una vuelta en U dentro de la cubeta y cae del rodete a velocidad cero.

En 1879, Lester Pelton, experimentando con una rueda de Knight, desarrolló un diseño de doble canchilón, que sacaba el agua hacia los lados, que eliminaba alguna pérdida de energía de la rueda de Knight que hacía retornar el agua hacia el centro de la rueda. Cerca de 1895, William Doble mejoró la forma del canchilón semicilíndrico de Pelton con un canchilón elíptico que incluía un corte en éste que le permite al chorro una entrada más limpia al canchilón. Esta es la forma moderna de la turbina Pelton, la que hoy día logra hasta un 92% eficiencia. Pelton había sido un promotor muy efectivo de su diseño y a pesar que Doble se hizo cargo de la compañía Pelton, no le cambió el nombre a Doble ya que a esta se le reconocía con ese nombre.

Las turbinas Turgo y de Flujo Cruzado son diseños posteriores de turbinas de impulso.

### **Teoría de Operación**

El agua que fluye se le dirige hacia las aspas del rodete, lo que crea una fuerza en las aspas. Ya que el rodete gira, la fuerza actúa a lo largo de una

distancia (fuerza que actúa a lo largo de una distancia es la definición de trabajo). De esta manera, la energía del caudal se le transfiere a la turbina.

A las turbinas hidráulicas se les divide en dos grupos: de reacción y de impulso.

La forma precisa de la turbina hidráulica, cualquiera que sea su diseño, se debe a la presión de la provisión de agua.

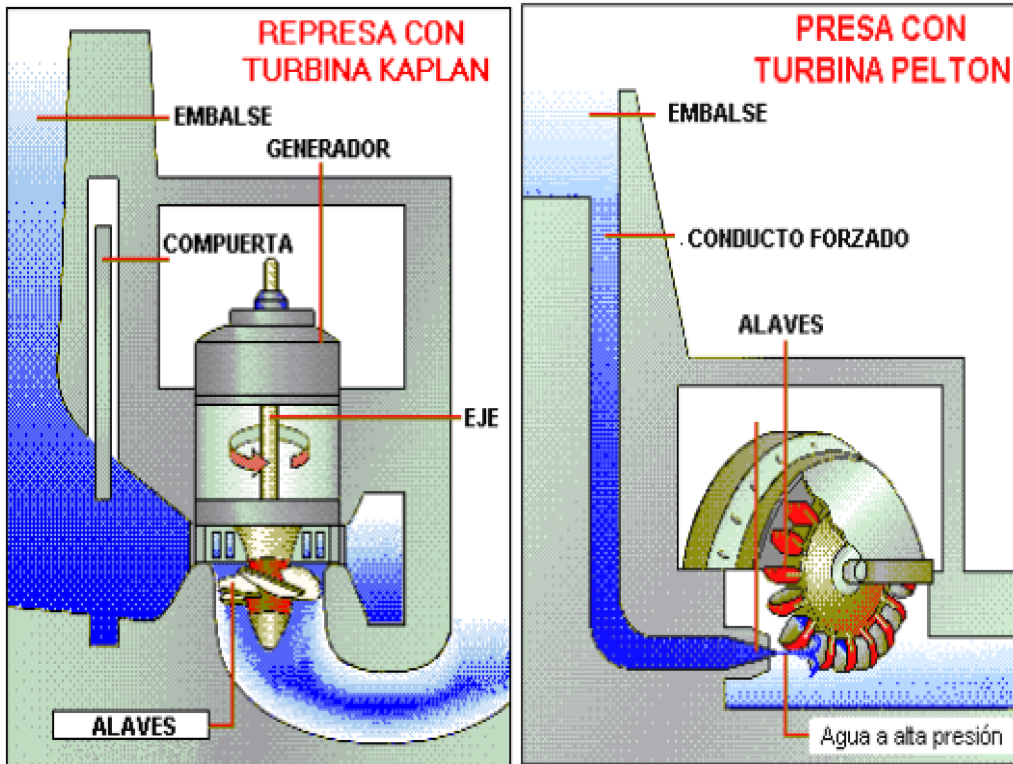
### **Turbinas de reacción**

El agua reacciona sobre las turbinas de reacción, la que cambia presión a manera que se pasa por la turbina y cede su energía. Tienen que estar encerradas para contener la presión de agua (o succión), o deben estar totalmente sumergidas dentro del flujo de agua.

La tercera ley de Newton describe la transferencia de energía en las turbinas de reacción, tales como las Francis.

La mayoría de turbinas en uso son de reacción. Se les usa en proyectos de caída corta y media.

Figura 3. Turbinas hidráulicas



### Turbina de impulso

Este tipo de turbinas cambian la velocidad de un chorro de agua. El chorro impacta las aspas curvadas, las que revierten el flujo. El cambio en impulse que resulte causa una fuerza en las aspas de la turbina. Debido a que la turbina esta girando, la fuerza actúa a lo largo de una distancia (trabajo) y el agua que se cambia dirección se le abandona con una energía disminuida.

Antes de impactar las aspas de la turbina, a la presión del agua (energía potencial) se le convierte en energía cinética, mediante un pitón o boquilla y se le dirige hacia la turbina. En las aspas de la turbina no ocurre ningún cambio de presión, y la turbina, para su operación, no requiere de ninguna carcasa.

La Segunda Ley de Newton describe la transferencia de energía de las turbinas de impulso.

A las turbinas de impulso mayormente se les utiliza en proyectos de muy alta altura.

### **Almacenamiento bombeado**

A algunas turbinas se les diseña para hidroelectricidad de almacenamiento bombeado. Se les puede revertir el caudal y que operen como bombas para llenar el dique alto durante las horas que no sean pico, y luego revertirlas a turbinas para la generación de potencia durante los picos de demanda eléctrica. Este tipo de turbina, usualmente, son de diseño Deriaz o Francis.

Esto, aquí en Guatemala y en el momento actual, resulta muy difícil de hacer ya que para esto se tendría que contar con un dique en la parte baja, lo que resulta muy caro y ahí en donde esto resulta impráctico. Tanto así que a veces los diques superiores casi siempre son pequeños, entre otras, porque no hay espacio para hacerlos más grandes por limitaciones de espacio, como en el caso del río Samalá.

### **Eficiencia**

Las turbinas hidráulicas grandes, modernas operan con eficiencias mecánicas arriba del 90% (no se confunda esto con la eficiencia termodinámica).

## **Tipos de turbinas hidráulicas**

Turbinas de reacción:

- Francis
- Kaplan, Hélice, Tubo, Bulbo y Straflo
- Tyson
- Rueda de agua

**Turbinas de impulso:**

- Pelton
- Turgo
- Michell–Banki (también se le conoce como la turbina de flujo cruzado y como Ossberger)

## **Diseño y aplicación**

La selección de la turbina se basa mayormente en la caída de agua disponible, y un poco menos en la velocidad del flujo disponible. En general, las turbinas de impulso se les utiliza en sitios de altas caídas, y las de reacción se les utiliza en sitios de baja caída. Las turbinas Kaplan se adaptan bien a amplios rangos de condiciones de flujo y caída, ya que su eficiencia máxima se puede lograr dentro de un amplio rango de condiciones de flujo.

Las turbinas pequeñas (mayormente de menos de 10 MW) pueden tener ejes horizontales, y hasta turbinas del tipo bulbo ligeramente grandes, de hasta 100 MW o algo así pueden ser horizontales. Las máquinas Francis y Kaplan muy grandes usualmente tienen ejes verticales debido a que esto, usualmente, hace un mejor uso de la caída disponible, ya hace más económica la instalación del generador. Las ruedas Pelton pueden ser de eje ya sea vertical u horizontal debido a que el tamaño de la máquina es

menor que la caída disponible. Algunas turbinas de impulso utilizan chorros múltiples por rodete para incrementar la velocidad específica y balancear el empuje al rodete.

### **Rangos típicos de las caídas**

- Kaplan  $2 < H < 40$  ( $H$  = altura en metros)
- Francis  $10 < H < 350$
- Pelton50  $< H < 1300$
- Turgo 50  $< H < 250$

### **Velocidad específica**

La velocidad específica,  $n_s$ , de una turbina caracteriza a forma de la turbina de una manera que no se relaciona con su tamaño. Esto permite que un nuevo diseño de turbina se haga a escala de un diseño existente cuyo funcionamiento se conozca. La velocidad específica es también el criterio principal para el acoplamiento de un sitio hidráulico específico al tipo de turbina correcto.

La velocidad específica de una turbina también se le puede definir como la velocidad de una turbina geoméricamente similar, ideal, que produzca una unidad de potencia por una unidad de caída.

Es el constructor en que da la velocidad específica de la turbina (junto con otras medidas) y siempre se refiere al punto de máxima eficiencia. Ésta permite que se hagan cálculos precisos respecto al comportamiento de la turbina dentro de un rango de caídas y caudales. Imagen adaptada de la 'Libro guía para legos, de la Comunidad Europea (en cómo desarrollar un pequeño proyecto hidráulico)'

(parámetro dimensionado),  $n = \text{rpm}$

(parámetro sin dimensional),  $\omega = \text{velocidad angular (radianes/segundo)}$



**Ejemplo:** Sí se tiene un caudal y una caída para un proyecto hidráulico, y el requerimiento de rpm del generador, calcular la velocidad específica. El resultado son los criterios principales para la selección de turbina.

También, la velocidad específica es el punto de inicio para el diseño analítico de cualquier turbina nueva. Tan pronto se conozca la velocidad específica que se desee, con facilidad se puede calcular las dimensiones básicas de las partes de la turbina.

Las Leyes de Afinidad permiten que se prediga la salida de la turbina en base a pruebas modelo. Una réplica en miniatura del diseño que se propone, de cerca de 0.3 m de diámetro, se le puede poner a prueba y las medidas de laboratorio se les puede aplicar, con alta confianza, al prototipo final. Las leyes de afinidad se les deriva requiriendo similitud entre el modelo de prueba y la aplicación.

El flujo por la turbina se le controla ya sea mediante una gran válvula o con compuertas con ventanillas<sup>1</sup> puestas al rededor del rodete de la turbina. A la caída diferencial y el flujo se les puede graficar para un número de diferentes valores de apertura de compuerta, lo que produce un diagrama de diagrama de colina que muestre la eficiencia de la turbina en varias condiciones.

### **Velocidad de desboque**

Esta es la velocidad a todo caudal y sin carga en el eje. A la turbina se le debe diseñar para sobrevivir a las fuerzas mecánicas de ésta. El constructor deberá proveer el dato de la velocidad de desboque.

### **Mantenimiento**

La turbina Francis, al final de su vida útil, muestra un picado debido a la cavitación y agrietamiento por fatiga y alguna falla catastrófica. Se harán

---

<sup>1</sup> En inglés, wicket gates, 'compuertas' ; también se le podría traducir como 'portillo' o 'postigo'.

visibles los trabajos de reparación anterior que hayan utilizado electrodos de soldadura de acero inoxidable.

A las turbinas se les diseña para que funcionen por décadas con muy poco mantenimiento de los elementos principales; los intervalos de mantenimiento periódico están en el orden de algunos años. El mantenimiento de los rodets y de las partes expuestas al agua incluye la remoción, inspección y reparación de las partes desgastadas.

El uso y desgaste normales con el picado debido a la cavitación, el quiebre debido a la fatiga, y a la abrasión que se debe a los sólidos suspendidos en el agua. A los elementos de acero se les repara mediante soldadura, usualmente con electrodos de acero inoxidable. A las áreas con daño se les corta o demuele, luego con soldadura se les vuelve a hacer o se les mejora el perfil. Al final de su vida útil, los viejos rodets pueden tener añadida una cantidad significativa de acero inoxidable que se haya añadido de esta manera. Se puede utilizar procesos elaborados de soldadura para el logro de reparaciones de la más alta calidad.

Entre los otros elementos que requieren inspección y reparación durante el mantenimiento periódico se incluye los cojinetes o chumaceras, la carcasa y las mangas del eje, los servomotores, los sistemas de enfriamiento de los cojinetes o chumaceras y de los devanados del generador, los sellos, los elementos de enlace de las compuertas de ventanilla y todas las superficies.

### **Impacto ambiental**

Las turbinas hidráulicas tienen impactos ambientales tanto positivos como negativos.

Son uno de los productores más limpios de energía, reemplazan la quema de combustibles fósiles y eliminan el desperdicio nuclear. Utilizan una

fuentes de energía renovable y se les diseñó para operar por décadas. Producen una cantidad significativa de la energía eléctrica mundial.

Históricamente, también tienen consecuencias negativas. Las aspas que giran o los rodetes con compuertas de las turbinas pueden interrumpir la ecología natural de los ríos, matar peces, parar las migraciones, y molestar la forma de vivir de la gente. Por ejemplo, las tribus de indios norteamericanos, en el Pacífico Noroeste su forma de vida se construyó alrededor de la pesca del salmón, pero una construcción agresiva de represas destruyó esta forma de vida. Desde finales del siglo XX ha sido posible construir sistemas hidrogeneradores que desvíen a los peces y a otros organismos de las tomas de las turbinas sin mucha pérdida de potencia ni daño significativo; tales sistemas requieren menos limpieza, pero son sustancialmente más caros de construir. En los Estados Unidos, ahora es ilegal bloquear la migración de los peces, así que los constructores de represas deben proveer escaleras para peces.

En la parte referente a las turbinas, la tecnología que se ha venido utilizando tiene ya un poco más del siglo y se va a utilizar un texto editado en 1909, que describe con muy buen detalle lo que se tiene que tomar en cuenta para la instalación o similar de plantas eléctricas—*Pelton Waterwheels*, 11ª edición, 1909, en inglés. Cabe decir, que este libro, en la actualidad, lo utilizan las personas que se dedican a la instalación, reparación, etc. de plantas hidráulicas.

El fundamento puramente teórico—y real—de los generadores eléctricos es el aprovechamiento de la energía de las caídas de agua, esto es: la conversión de la energía potencial del agua en energía eléctrica.

energía potencial del agua = energía eléctrica

y la potencia teórica—suponiendo un 100% de eficiencia—, en vatios es:

$$P = \text{presión hidráulica} \times \text{caudal}$$

$$P = (\rho \times g \times h) \times (q)$$

en donde:

- $\rho$ : la densidad del agua, 1,000 kilogramos/ metro cúbico
- $g$ : la constante de gravedad, 9.81 metros/segundo al cuadrado
- $h$ : la caída que se tenga, en metros
- $q$ : el caudal de diseño, en metros cúbicos por segundo, y
- $\eta$ : la eficiencia, sin dimensional

al tomar en cuenta la eficiencia —  $\eta$  — se puede deducir la potencia real:

$$p = (\eta) \times (\rho \times g \times h) \times (q) / 1,000,000 \text{ (megavatios)}$$

En nuestro caso particular, el hidrogenerador de Zunil, se tiene una caída efectiva de 32 metros y un caudal de 3 metros cúbicos por segundo y una eficiencia de un 90%, esto nos da una potencia de

$$P = (0.9) \times (1000 \times 9.81 \times 32) \times (3) / 1,000,000 = 856 \text{ MW}$$

Por otro lado, como parte del diseño o rediseño, se tiene que escoger el tipo de turbina a utilizarse. En base al libro *Pelton Waterwheels*, con la altura que se tiene de 32 metros o similar, esto es una caída media y la turbina que mejor se adapta es la turbina tipo Francis.

Algo muy importante, no se va a hacer el diseño de la turbina, sólo se va a encontrar los datos y requerimientos de la misma, ya que en la realidad, es el fabricante el que la diseña y la fabrica de acuerdo a las especificaciones propias de cada uno de los casos.

De la experiencia, el desgaste en las partes mecánicas se debe mayormente a la abrasión y a la cavitación.

**La abrasión**, como ya se ha dicho en uno de los párrafos anteriores, se debe a los sólidos en suspensión dentro del agua. En nuestro caso particular, el río Samalá, el proveedor de agua a nuestro hidrogenerador, es un río de aguas negras, y también trae consigo mucho lodo y arena, en especial durante la temporada lluviosa. Lo anterior hace que tanto los rodetes como las turbinas tengan un mayor desgaste que en otros sitios en donde el agua es más limpia. De la experiencia a lo largo de medio siglo de uso de esta planta, este es el factor que más ha afectado las turbinas, tanto las partes fijas, es decir: la carcasa y similares, como las partes móviles, el rodete y los canjilones. Cada vez que se le ha tenido que dar mantenimiento a la parte hidráulica, invariablemente se ha tenido que reconstruir el rodete con todo y sus canjilones y, en algunas ocasiones, se ha tenido que reconstruir la carcasa.

**Respecto a la cavitación**, ésta consiste en que en la toma, tubería arriba, se puede introducir burbujas de aire que luego de viajar hacia la turbina, por la tubería de presión, ven sus dimensiones reducidas debidas a la presión de agua circundante. Pero, al momento de estar en la turbina y de estar a punto de salir de nuevo a la presión atmosférica, estallan al dejar de tener la presión que tenían acumulada a su alrededor. Esta liberación repentina de energía hace que las paredes de los elementos circundantes reciban un choque tanto sónico como mecánico que se manifiesta, luego de largo tiempo, en piquetes en las superficies. Existen maneras de evitar este fenómeno y se les debe de utilizar, principalmente, al momento de la toma del agua, justo antes de la entrada a la tubería de presión. Un ejemplo de cavitación en un canjilón o aspa de una turbina Francis.

**Figura 4. Cavitación en un canjilón**



**Acerca del componente eléctrico:**

Se cuenta con un generador trifásico, que genera a 2,400 voltios, con una potencia de 1.2 megavatios, con excitatriz separada, de eje horizontal, que funciona a 900 rpm.

Este componente va a estar fuera del alcance del estudio propiamente mecánico. También cuando en la realidad se haga todo este trabajo, el fabricante sólo necesita de los datos, ya que será él el que se haga cargo

de todo el trabajo de diseño, construcción, transporte e instalación. Por lo general, este tipo de generadores, se les hace a la medida y especificaciones propias en cada uno de los casos.

Que sólo se necesita de los datos mínimos, como lo son la caída efectiva y el caudal de diseño y ellos, en general, ya tienen el hidrogenerador que mejor se ajuste a las condiciones. Hay que hacer notar que esto no ha sido siempre así, es hasta ahora que China se ha estado introduciendo al mercado mundial que esto ha sido posible. Los europeos y estadounidenses y demás, siempre hicieron los equipos a la medida; China por su lado, siendo tan grande y tan poblada y con un régimen centralizado, estandarizó los tamaños y las formas de los equipos hidrogeneradores de manera tal que se les pudiera fabricar e instalar con mayor facilidad y rapidez.

#### **Acerca del componente gerencial:**

Aquí la teoría básica va a ser el folleto de *Investigaciones*, de L. Ron Hubbard, en donde se tiene la tecnología para el encuentro de las causas de cualquier situación<sup>2</sup>.

En el presente trabajo, que aunque se le utilice y a partir de esto encontremos la razón básica por la que esta planta ha caído a cerca de 1/3 de su potencia original, y que con esta razón podamos, de alguna manera, llevarla esencialmente con poca inversión a una producción muy cercana, si no es que mayor a la original de 1.2 KW, no nos vamos a introducir muy a

---

<sup>2</sup> Este es un breve resumen, muy gráfico, de La serie de datos, del mismo autor, la cual en sí es bastante extensa y un curso de unas 700 a 900 horas, esto es de tres a cuatro trimestres de una maestría normal. Es la tecnología más moderna y precisa para el encuentro de las razones básicas, tanto buenas como malas, para mejorar cualquier situación. Esto es: en el caso de una mala situación, se encuentra la causa y se le soluciona, lo que tiene que dar como resultado que la unidad, máquina, empresa, etc. vuelva a producir lo que debe producir; en el caso de una buena situación, al encontrarse la razón, se le refuerza para que la buena situación siga y se expanda. Se recomienda la lectura de este pequeño folleto, es muy útil.

fondo en explicarla ni reportarla, pero sí vamos a utilizarla y nos vamos a dedicar a resolver el componente mecánico del problema.

Como se verá en las recomendaciones, si se toma en cuenta este componente sólo cuando no nos podamos deshacer de él.

### **1.7 Funcionamiento real:**

En las siguientes páginas se va a dar una visión que además de gráfica debida a las fotografías resumida de cómo es que la planta está trabajando en la actualidad.

**Dique de la planta:** aquí es en donde da inicio la planta como tal. Antes de esto está el río y aquí es su primer paso para que luego se le introduzca al desarenador. Como se puede ver en la figura 5, el dique está perpendicular al plano de la foto, se puede ver, con cierta dificultad, la cantidad de basura que trae el río Samalá. Justo medio kilómetro antes, río arriba, está la segunda planta eléctrica de la Fábrica de Cantel.

Lo blanco que se ve tanto en el agua de la presa como a la salida del rebalse de la misma es espuma de jabón. Hay que tomar en cuenta que el agua que mayor mente trae el río Samalá son aguas negras principalmente de la ciudad de Quetzaltenango, lo que da algunos problemas tales como la cavitación, debido a las burbujas y la abrasión debida a los sólidos en suspensión pero, también tiene la ventaja tal como que el caudal tiende a ser más constante.

Un problema fuerte con este dique es, que debido a que trae demasiada basura residuos plásticos, pedazos de madera y leña, etc. Hay que estarle dando un mantenimiento constante para evitar que estos azolven la escasa capacidad de almacenamiento con que se cuenta, que es de cerca de 2 horas.



**Figura 5. Dique de la Planta**



**El desarenador:** La teoría básica de éste es que al aumentarle el área de paso al flujo, la velocidad de éste disminuye, y se disminuye de manera notable con lo que muchos de los sólidos en suspensión tienden a depositarse en el fondo del canal. Al fondo se puede ver las compuertas de entrada al mismo.

**Figura 6. Desarenador**



**Compuerta de entrada al desarenador:** esta es una vista más cercana a las compuertas, las que se ven al fondo en el párrafo y foto anterior.

**Figura 7. Compuerta de entrada al desarenador**



**Otra vista del desarenador:** En esta toma se puede ver cómo es que algunos sólidos como bolsas plásticas y otros residuos similares han quedado atorados dentro de un dispositivo dentro del canal.

**Figura 8. Vista del desarenador**



**Parte del canal desarenador:** en esta vista se puede apreciar cómo ha quedado el canal luego de dragarlo.

**Figura 9. Canal desarenador**



**Reja de entrada a la toma:** aquí se puede apreciar la reja de entrada a la tubería de presión; también, como es que en esta quedan atorados muchos residuos, tales como: plásticos, cajas de chicle, etc. que, constantemente, se les tiene que remover con un cepillo en forma de ‘peine’, que se le ha hecho a la medida de la rejilla para que de esa forma se mantenga limpia la misma. Tiene que haber un hombre, casi a tiempo completo encargándose de tarea. También puede notarse que no existe ningún dispositivo que a nivel de la toma evite que las burbujas de aire puedan entrar en la tubería de presión.

**Figura 10. Reja de entrada a la toma**



**Figura 11. Vista de la toma, sólo que llena y en funcionamiento**



**Figura 12. Muro de inicio**

**Muro de la toma e inicio de la tubería de presión:** aquí se puede apreciar la parte trasera de la toma de la tubería de presión la parte de trasera de la toma de la foto anterior. Se puede notar el muro de piedra que se encarga de fijarla firmemente al piso.



**Vista de la tubería de presión:** en ésta se puede apreciar la tubería de presión aproximadamente a la mitad de su recorrido entre la toma y la turbina. Vista hacia abajo, se puede apreciar la antigua casa de máquinas y a la derecha las tuberías de presión de la antigua planta:

**Figura 13. Tubería de presión**



**Vista de la tubería de presión:** vista hacia arriba a la izquierda de la tubería, al fondo se puede apreciar la antigua casa de máquinas; se puede apreciar cómo es que la tubería está empotrada y sostenida:

**Figura 14. Otra vista de la tubería de presión**



**Otra vista de la tubería de presión,** desde la llegada a la casa de máquinas, en donde se encuentra la turbina y el generador.

**Figura 15. Final de la tubería de presión**



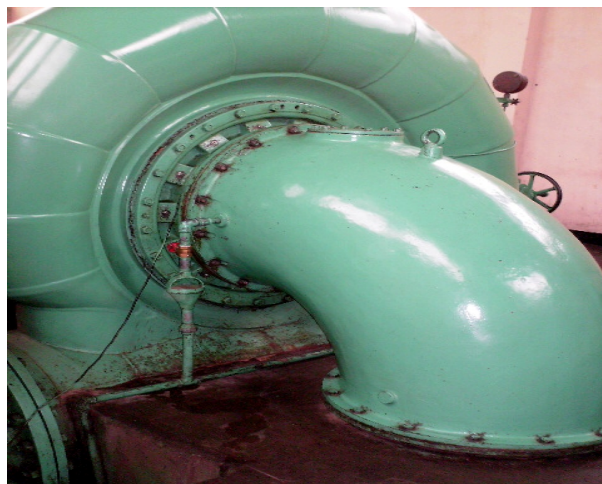
**Vista del caracol de entrada a la turbina Francis:** Ya en la casa de máquinas, justo luego de entrar, se puede apreciar la turbina Francis y su tubo de escape; también, se puede apreciar el ‘caracol’. Internamente, esto rodea el rodete. Esta turbina es de eje horizontal y tiene cerca de 3 metros de altura.

**Figura 16. Caracol de la Turbina Francis**



**Salida de agua de la turbina Francis:** otra vista de la salida de la turbina, nótese cómo es que la tubería está firmemente adherida a la turbina mediante pernos, muy a pesar que aquí la presión del agua ya está cercana, de nuevo, a la presión atmosférica.

**Figura 17. Salida de agua de la Turbina Francis**



**Vista de la excitatriz del generador:** aquí se puede observar cómo es que excitatriz que es el generador de corriente directa que se encarga de proveerle de corriente de campo al generador principal está acoplada a parte final del eje que inicia en la turbina, pasa por el volante, luego por el generador y al final termina con ésta. También se puede apreciar la última chumacera y los anillos de deslizamiento que son los que se encargan de pasarle la corriente directa al campo del generador, el cual es el rotor del generador.

**Figura 18. Excitatriz del generador**



En los equipos actuales, generalmente, ésta ya no es ninguna unidad separada, sino que, debido a la tecnología actual de semiconductores, del mismo generador se saca la energía alterna, luego se le rectifica y regula, y de nuevo se le introduce al campo del generador. Todo esto hace que la eficiencia general del turbogenerador sea más alta.

En aquel entonces (1957), no había ninguna otra elección que poner un generador separado de corriente directa. Esto añade más masa rodante, pérdidas por chispeo y corrimiento de campos.



Este tipo de turbogeneradores tenía cerca de un 80% de eficiencia total, hoy para las mismas condiciones se tiene cerca de un 90%.

**El regulador de velocidad:** del cual sale el brazo que controla las compuertas: Éste, originalmente, funcionó de manera totalmente automática. Hoy día, se le tiene que hacer de manera manual con vista en el frecuencímetro (que es la foto siguiente) y ver que la frecuencia se mantenga en los 60 ciclos/ segundo. Esto exige que una persona a tiempo completo esté a cargo de la válvula la que se le maneja mediante el volante que está al extremo, mano derecha, del regulador.

**Figura 19. Regulador de velocidad**



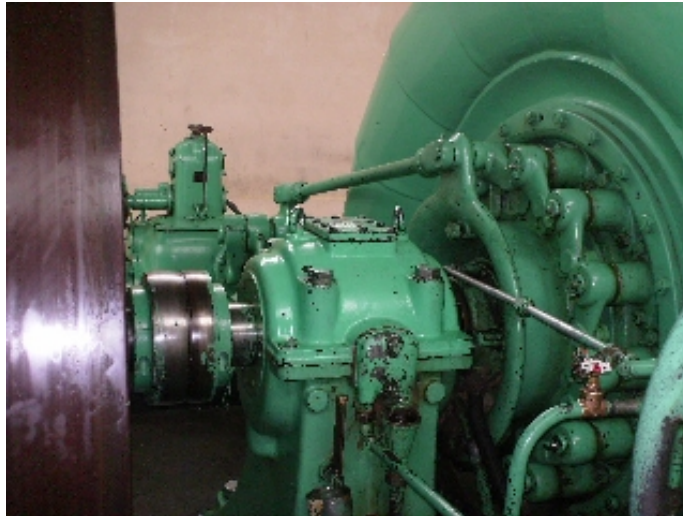
**Frecuencímetro:** el que le sirve de indicador al que controla manualmente la frecuencia. Éste es todavía mecánico o de lengüetas, es el indicador cuadrado a mano derecha del indicador circular. Hoy día existen indicadores electrónicos que son mucho más precisos y con más funciones que éstos. Originalmente sólo servía para verificar que la frecuencia estuviera a los 60 ciclos por segundo ya que el regulador automático se encargaba de mantener la frecuencia en su rango sin la ayuda manual de nadie.

**Figura 20. Frecuencímetro**



**La palanca de control de compuertas de la turbina:** el regulador es el que se encuentra al fondo de la foto, a mano izquierda se ve una parte del volante y a mano derecha está la turbina misma. La palanca que sale del medio hacia el centro de la turbina es la que viene del regulador y llega a los controles externos de las compuertas que controlan el flujo de entrada a la Turbina.

**Figura 21. Palanca de control de la Turbina**



**Vista de la chumacera principal:** la que está entre la turbina y el generador, la cual tiene enfriamiento por agua. Esta hace la función de cojinete principal entre el volante y la turbina y, por esto mismo, se encarga de soportar el peso y la reacción del agua con la turbina. Cabe notar que el enfriamiento por medio de agua limpia, ésta entra a temperatura ambiente y sale casi hirviendo, lo que nos demuestra que aquí se disipa más energía de lo que hoy en día los generadores actuales desperdician.

**Figura 22. Chumacera principal**



**Vista del generador mismo:** La persona que ahí se ve está entre el volante y el generador. Éste es de 1.25 MW.

**Figura 23. Generador**



Generador Trifásico

Velocidad Angular: 1,800 rpm

Potencia Generada: 40 Kw

Frecuencia: 60 Hz

Amperaje: 131

Factor de Potencia. 0.8

**El volante:** Esta es una masa rodante de acero que se encarga de acumular parte de la energía mecánica, la que ayuda a mantener constante la velocidad angular del eje aun en casos de cambios fuertes de carga. Cabe notar que los grupos hidrogenadores chinos actuales ya no cuentan con esto, en primer lugar, porque consumen mucha energía y consecuentemente bajan la eficiencia y, en segundo lugar, hoy día con la tecnología electrónica de control existente esto ya no es necesario.

**Figura 24. Volante**



**Tablero de control del generador:** en éste se encuentran los indicadores eléctricos. La mayoría de ellos ya no funcionan y su reparación sería simple si se les encontrara los repuestos en plaza; el problema es que ya no existen indicadores de estos modelos, se tendría que cambiar todo el tablero. El tablero es Brown-Boveri y ya nos hemos puesto en comunicación con los actuales representantes de esta casa en nuestro país y la información que aquí damos es la que ellos brindaron.

**Figura 25. Tablero del generador**



**Vista del rodete de la turbina:** se puede apreciar en éste los efectos de la cavitación y de al abrasión. Viendo ya de cerca el rodete, se puede apreciar que el efecto mayor de desgaste se debe a la cavitación; cosa que ahora, luego de la revisión física de toda la planta resulta totalmente notorio. Basta recordar que en la toma de la tubería a presión no existe ningún dispositivo que evite que las burbujas de aire se introduzcan a la misma y que luego de

pasar toda la tubería de presión, llegando hasta el rodete sea allí en donde estallen, al encontrarse de nuevo a la presión atmosférica normal. También, esto se puede evitar mediante una chimenea de escape que consiste en un tubo vertical que sale de la tubería de presión, que llega a una altura un poco mayor que la de la toma y que, generalmente, se le encuentra en las cercanías de la toma de la turbina; su función es:

- (1) En el caso de un paro repentino en la turbina, evitar el golpe de ariete<sup>3</sup>, y
- (2) Encargarse de sacarle las burbujas de aire al agua que se dirige hacia la turbina misma.

Lo que aquí se logra ver es que la ausencia:

- (3) Del dispositivo, en la toma de la tubería a presión, que se encarga de sacarle el aire al flujo de agua y
- (4) Del la chimenea de escape hacen que cada cierto tiempo (de 2 a 4 años) se tenga que rehacer el rodete de la turbina debido al desgaste del mismo debido principalmente a la cavitación<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> Golpe de ariete: cuando el flujo se conduce por una tubería, éste tiene una energía cinética debida al movimiento de la masa del mismo si, de pronto, este se interrumpe causa que el flujo—al ser incompresible, se estrelle contra las válvulas; como no puede abrirlas, retorna y se echa hacia atrás causando una alta presión en toda la tubería. En algunos casos, si la tubería no está firmemente empotrada, puede culebrear (moverse como culebra) y hasta se puede llegar a romperse.

<sup>4</sup> Cavitación: en realidad es un fenómeno parecido a la caries (de ahí el nombre, del inglés 'cavity' que significa caries) principalmente en las aspas del rodete, debido al estallido de burbujas de aire que se han logrado introducir en la toma de la tubería a presión, que luego de haber recorrido toda la tubería a presión y de haber aumentado su presión interna con una presión igual a la caída efectiva—y de reducir su volumen debido a la misma—, de pronto, al

**Figura 26. Rodete de la Turbina**



**Algunas paletas de la compuerta de la turbina:** las compuertas tienen la apariencia de martillos; su funcionamiento es similar al de una persiana, sólo que dispuestas de manera circular, alrededor del rodete. En las paletas se puede apreciar el efecto de la cavitación.

**Figura 27. Paletas de la Turbina**



**El antiguo banco de transformación de 2,400/30,000 V:** Originalmente, y durante casi 40 años el voltaje de la línea entre esta planta y la ciudad de



Quetzaltenango fue de 30,000 voltios. Luego, se le bajó a los 13,200 voltios para que también se pudiera utilizar la energía de esta planta para cubrir los municipios cercanos de Zunil y Almolonga. Hoy día todo este banco está en desuso y el voltaje de 30,000 voltios que era la norma europea ya no se le utiliza en el sistema interconectado nacional.

**Figura 28. Antiguo banco de transformación**



**La salida eléctrica del generador en el patio de transformación:**  
Viene en forma subterránea desde el Generador:

**Figura 29. La salida eléctrica del generador**



**El nuevo banco de transformación de 2,400/13,200 voltios.** Como se puede apreciar, cada uno de los transformadores es de 500 KW, lo que nos da una capacidad instalada de 1.5 MW.

**Figura 30. Nuevo banco de transformación**



**La casa de máquinas:** desde el costado sur de la misma. A mano izquierda de la misma se puede ver el canal de desagüe de la turbina. A mano derecha, se logra ver la llegada de la tubería de presión a la casa de máquinas. Se puede ver cómo es que la tubería entra a la turbina con un codo a 90°. Este codo, de acuerdo a las tablas del libro *Pelton Waterwheels* resta cerca de 1 metro a la caída efectiva. Al fondo del portón, el cual está casi siempre abierto, se puede ver el generador.

**Figura 31. Casa de máquinas**



**Salida final del canal de desagüe de la turbina:** de la salida de la turbina hasta esta salida hay una caída cerca a los 3 metros que, más adelante se le podría utilizar. Sólo que para esto hay que escavarle a la zanja los 3 metros y tiene cerca de 100 metros, pero sería un 8% más de caída que se le podría utilizar.

**Figura 32. Salida final del canal**



### **1.8 Mantenimiento propuesto por el fabricante:**

En este punto, será el fabricante del hidrogenerador el que proponga qué tipo de mantenimiento y en qué tiempos se deba darlo.

En este trabajo resultaría anticipado y relativamente inútil el describir el mantenimiento de algo que aún no sabemos qué va a ser.

Lo que sí se puede hacer con certeza es insistir en asegurarse de que los fabricantes sí den los manuales tanto descriptivos como de mantenimiento para que, en el futuro, a la gente encargada se le pueda mantener entrenada para que la planta funcione bien. Y qué mejor

garantía que los encargados conozcan tanto el funcionamiento cómo la forma de reparar las máquinas.

También habrá que asegurarse de que los originales de los manuales se les tenga en un lugar seguro, además de una copia en la biblioteca municipal o algún lugar parecido, para que cuando décadas más tarde se les necesite, se les pueda encontrar y utilizar. Esta recomendación se hace debido a que uno de los problemas actuales es que no se cuenta con los manuales de la planta actual; en algún punto se les perdió y hoy no hay manera de encontrarlos. También que siempre haya una copia en idioma inglés ya que a veces las traducciones pueden dar problemas de palabras que aunque castellanas no se les utilice aquí y no hay como poderse referir a un original en inglés en donde la nomenclatura tiende a ser mucho más estable, y que se tienen muy buenos diccionarios en este idioma; cosa que no sucede con el español.

## **2. FASE DE INVESTIGACIÓN**

### **2.1 Descripción actual de los sistemas:**

#### **2.1.1 Hidráulico**

Este sistema, a pesar del medio siglo de uso, en general, se encuentra bien, sólo que por las características del río Samalá, se requiere de un mantenimiento mucho mayor que si el río fuera de aguas limpias y cristalinas.

La tubería a presión, los codos y demás: de acuerdo a una charla con el señor Gilberto Matamba<sup>5</sup>, quien dio un criterio para ver si la misma está o no en buen estado, aparentemente no muestra problemas por el momento. Aunque sí habría que introducirse a la misma y revisarla físicamente.

La turbina, ya se ha descrito cuáles son sus problemas, principalmente, la cavitación y la abrasión, lo que hace que cada cierto tiempo se haga necesario una reconstrucción casi total del rodete; una reconstrucción parcial de las compuertas y de la carcasa.

Debido a esto, es que se cuenta con dos rodetes; mientras uno está en uso, en otro debe estar en reconstrucción.

La única manera que se ha venido utilizando para saber del estado del rodete es la baja eficiencia de generación. En apariencia y desde el punto de vista la administración municipal, este sistema les funciona y evita por algún tiempo el 'gasto' de algunas decenas de millares de quetzales, sin embargo nunca toman en cuenta los millones de quetzales de agua que pasa sin utilizarse debido a tener rodetes desgastados.

---

<sup>5</sup> El señor Gilberto Matamba, diseña, construye, repara, reconstruye e instala turbinas, tuberías de presión, arietes, etc. Su taller tiene ya más de 20 años de existencia.

### **2.1.2 Mecánico:**

Este componente, en ese caso en particular, principalmente tiene que ver con el eje el que va desde la turbina, pasa por el generador y termina con la excitatriz y las chumaceras.

La parte más crítica son las chumaceras a las que se les tiene que estar reconstruyendo debido al desgaste normal.

Como su ha podido ver en la figura 22 de la chumacera principal, la cual se debe enfriar por medio de agua limpia.

Las otras dos chumaceras tienden a dar mucho menos problemas. Sin embargo hace unos 3 años, debido a la falla de la chumacera central, se sentó el generador y comenzó a rozar con el estator e hizo que fallara la chumacera final, por lo que se tuvieron que reemplazar a las dos.

La solución que aquí se tiene es que se tienen las suficientes piezas de repuesto para que en caso de falla sólo se les reemplace. Fue lo que sucedió con las chumaceras: afortunadamente, se tenía las dos que se reemplazó.

### **2.1.3. Eléctrico:**

A lo largo de todo este medio siglo, el componente eléctrico ha dado muy pocos problemas.

En la actualidad, aun si el componente hidráulico funcionara perfectamente, el generador sólo llegaría a cerca de los 900 KW. En otras palabras, su capacidad generativa ha disminuido.

Su vida útil de 30 ó 40 años ya se ha sobrepasado y las nuevas generaciones de este tipo de equipo son hoy más eficientes que con las que se contaba hace medio siglo.

En nuestro caso en particular, una diferencia de un 10% en eficiencia equivalen en términos reales a cerca de ½ millón de quetzales por año. Se habla de un 10% ya que es lo que los generadores actuales le tienen de ventaja a los de hace medio siglo. En consecuencia, se tiene que contar con el equipo lo más eficiente posible para que no se tenga esa pérdida financiera.

Hay que hacer notar que los generadores, al menos en el último siglo y medio, han sido muy eficientes, sólo que la eficiencia hace medio siglo estaba alrededor del 80% y ahora se encuentra en el 90%. Sólo para tener un punto de comparación, los autos de gasolina tienen una eficiencia máxima cercana al 30%.

#### **2.1.4 Administrativo:**

Básicamente, consiste en:

- 1) División de Comunicaciones: personal, comunicaciones, inspecciones, y reportes: la primera parte la hace el Departamento de Personal de la Municipalidad de Quetzaltenango, la segunda parte, están los mensajeros; y el tercero, es algo que mayormente está descuidado.
- 2) División de Diseminación: mercadotecnia, publicaciones y registro de nuevos clientes: se ha introducido algo de la primera, pero no se ha dirigido en especial al público meta; lo mismo ha sucedido con las publicaciones y el registro de nuevos clientes ha sido lo que ha ido llegando, no se ha hecho de manera sistemática habiendo un campo enorme a la expansión.
- 3) División de Tesorería: ingreso, egreso y registros, activos y materiales: esto está bastante normal y sí se le lleva a cabo de una manera estándar, en especial tanto el ingreso como el egreso,



aunque, debido a la intromisión municipal, a lo largo de décadas, la empresa no ha estado muy solvente. No así lo concerniente al tercero, ya que el deber principal de esta área es que los activos y materiales conserven y hagan crecer su valor, Aquí ha habido algún descuido, desafortunadamente muy normal en los entes públicos.

- 4) División de Producción: servicios de producción; entrenamiento, producción: la primer área se encarga de prever y predecir lo que se necesite para producir y hacer que todas las provisiones y equipos estén listos para la entrega; la segunda área, se encarga de preparar los recursos necesarios para la producción o compra de energía para que la EEMQ la pueda distribuir; y producción debido a que la EEMQ es una empresa distribuidora a entregar un servicio eléctrico de buena calidad de manera que la gente esté satisfecha con los resultados.

Las dos primeras secciones tienen algún problema, ya que no se prevee nada para la entrega ni en general no se entrena al personal para su puesto. La última sección sí está funcionando bastante bien aunque sí se le podría mejorar ampliamente para tener un mejor servicio.

- 5) División de calificaciones: exámenes, revisión y certificaciones y premios: sí existe más de algún examen de los productos y de las habilidades de la gente que trabaja con la EEMQ, pero no se le hace de manera sistemática ni generalizada; respecto a la tercera área, no se hace ninguna certificación, salvo en los cursos esporádicos.

- 6) División Pública, desde hace cerca de un par de años, se cuenta con una Oficina de RRPP, la encargada de hacer públicos los buenos productos de la empresa EEMQ, que tiene el mejor precio del mercado centroamericano.

7) División Ejecutiva: esta división coordina y supervisa las actividades de la empresa de manera que funcione con fluidez, elabore sus productos en forma viable y entregue sus productos y servicios a su público y a la comunidad con una alta calidad.

De esto y en la actualidad, en una proporción muy alta, es la Gerencia Administrativa la que se encarga de esta área. Sin embargo muy limitada por la intromisión aleatoria de la Municipalidad de Quetzaltenango.

Aquí es en donde se tiene buena parte del problema de la planta de Zunil. Por un lado, los que deben tomar las decisiones fuera de la EEMQ, en la Municipalidad en general, no tienen idea de las metas, propósitos, políticas específicas, planes, programas, proyectos, órdenes, escenas ideales, estadísticas, ni productos finales valiosos de la EEMQ, ni de sus componentes específicos. Sin embargo, tan pronto como resultan electos y toman el cargo, tienden a saltarse el organigrama. Este fenómeno va disminuyendo a manera que los elementos del Consejo se van familiarizando con cada una de sus áreas, pero, cuando ya saben es cuando tienen que dejar el cargo y de nuevo se repite el fenómeno con la administración entrante.

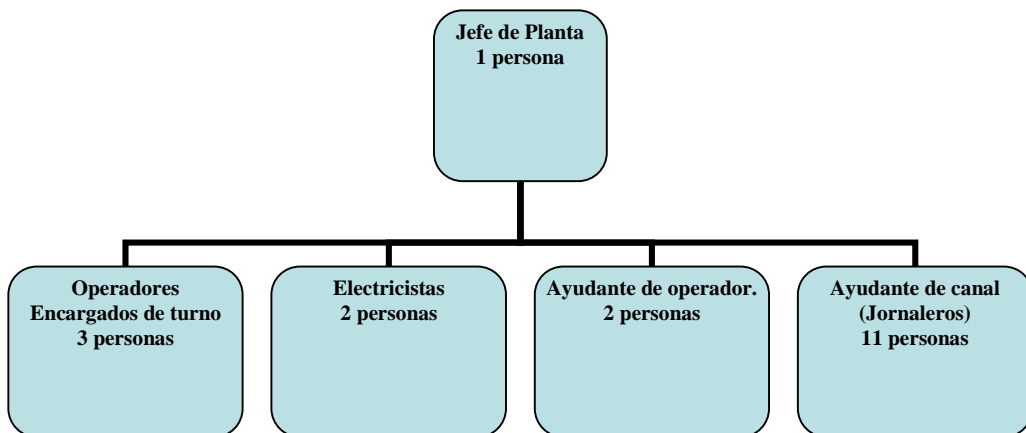
## 8) Organigrama actual.

La planta hidroeléctrica Zunil II, opera con 20 personas, los cuales son empleados de la EEMQ.

Adolecen de insumos importantes para realizar las operaciones de la planta y disponen de poca información de las operaciones, no hay archivos de las actividades realizadas años atrás y no tienen equipamiento informático ni de comunicación para desarrollar un trabajo apropiado.

Con estas condiciones de operación se reduce la eficiencia global a un proyecto de tipo artesanal que no respalda una realidad en la certeza del suministro ya que puede tener fallas o problemas de tipo operativo que pueden conllevar a que sea inconsistente con un grado de compromiso adquirido.

**Figura 33. Organigrama actual**



Organigrama del personal de la Hidroeléctrica Zunil 1 Quetzaltenango

El esquema organizativo centraliza mucha de su carga de las funciones de responsabilidad en el jefe de planta, este puesto no tiene un mando sustituto que realice las funciones del Jefe de planta haciendo vulnerable la dirección de la misma.

Los puestos operativos tienen bien definidas sus funciones y operan con eficiencia la instalación.

El grupo de “ayudantes de canal” existe por la forma manual de apertura de las compuertas y el trabajo de limpieza de los canales y actividades colaterales relacionadas con la infraestructura existente.

Las actividades de este grupo de empleados, debe cambiar al realizar las transformaciones de la instalación ya que se sugiere automatizar las compuertas a un nivel que se dispongan de componentes hidráulicos para su operación, mandados desde el centro de controles de la hidroeléctrica. Estas transformaciones e implementaciones de sistemas modernos de tecnología para el control implicarán cambiar las funciones de este personal y será una decisión de la administración de el EEMQ; Adoptarlos para que operen del modo propuesto.

## **2.2 Establecimiento de las secuencias de funcionamiento de la planta:**

- 1) El agua entra al sistema a través del dique, el que le quita buena parte de los sólidos.
- 2) Se le pasa al desarenador, el cual se encarga de quitarle buena parte de la arena que el agua lleve.
- 3) El agua pasa a la toma de la tubería a presión.
- 4) La tubería a presión lleva el agua río abajo, aumentado de presión a medida que baje el agua, hasta la turbina Francis.

- 5) La turbina se encarga de hacer la transferencia de energía que el agua lleve, debido a la altura y velocidad del flujo, en energía mecánica que se transfiera al eje.
- 6) El eje se encarga de transferir la energía mecánica al generador eléctrico, el cual convierte finalmente la energía mecánica en energía eléctrica, luego.
- 7) La energía eléctrica que se genera en 2,400 voltios se le tiene que transformar para transportarla y utilizarla, para eso el banco de transformación la eleva a 13,200 voltios.

### 2.3 Diagnóstico de cada uno de los sistemas:

• **Sistema hidráulico:** en general y debido a que es uno de los que menos se le ha podido descuidar, tiene sus problemas pero funciona y lo hace relativamente bien; no necesita de cambios mayores, excepto que el de quitarle la última vuelta en ángulo recto que como vimos, el quitar este codo, nos daría cerca de un metro más de caída efectiva. Si resulta muy aconsejable darle una buena revisada para corregirle todos aquellos puntos que necesiten mejora.

Se necesita de un nuevo regulador de velocidad, sólo que ya con tecnología nueva el anterior era totalmente hidromecánico, hoy son más bien electrónicos mucho más precisos y económicos.

En un nuevo diseño se va a necesitar de una chimenea de escape para evitar la cavitación (que es lo que más se logra ver en el rodete) y también para evitar el golpe de ariete.

• **Sistema mecánico:** quizá por ser casi sólo lo relacionado con el eje y las chumaceras, tampoco se necesita de cambios ni de reparaciones mayores.

• **Sistema eléctrico:** también este sistema, por su propia naturaleza, no ha permitido que se le descuide al extremo.

Sí se necesita de:

(1) Un tablero de control nuevo.

(2) De un sistema de sincronización para que a esta máquina se le pueda poner directamente a la red del Sistema Nacional Interconectado.

• **Sistema administrativo:** en lo relativo a este punto, lo más aconsejable es hacer lo que el Gobierno Central hiciera en 1963/1964 que fue cuando se creó el INDE para separar las responsabilidades del Gobierno mismo: la creación de un ente independiente y autónomo, que siga siendo propiedad de la Municipalidad y, aún mejor, podría ser de capital mixto y que se encargara de la generación y distribución de la energía en el Occidente del país. Se ha contado con algunas iniciativas para que esto se haga.

Se hace este comentario porque un muy alto porcentaje de las causas de la caída de producción de esta planta se debe más, que a nada, a las deficiencias administrativas y no a las técnicas.

O, aun las fallas técnicas se les puede imputar a fallas administrativas básicas. Como el hecho de que la EEMQ no cuente con el suficiente personal técnico debido a que en la contratación tenga que tomarse en cuenta asuntos de la Municipalidad de Quetzaltenango. O que por años de años la EEMQ no haya contado con ningún ingeniero electricista o similar debido a que la Municipalidad estaba tratando de ahorrarse el pago del mismo.



### 3

## FASE TÉCNICO–PROFESIONAL

### 3.1 La turbina tipo Francis.

El uso continuo y la calidad del agua que se turбина, adicionado a la ineficiencia del sistema de desarenadores por las fluctuaciones de velocidad en el flujo. Componen el conjunto de causas que desgastan el material de los rodetes de la turbina al grado que los alabes sufren pérdida de sección y esto ocasiona pérdidas de eficiencia. Se observa en deterioro en el rodete de la turbina, esta es una causa de la ineficiencia de la turbina, dado que al operarla en estas condiciones se traduce en diferencias sustanciales de la energía generada.

**Figura 34. Pérdida de sección del alabe de la turbina**



Grado de desgaste del rodete de la turbina tipo Francis



### 3.2 El distribuidor.

- **Misión:** Dirigir convenientemente el agua hacia los álabes del rodete, regulando el caudal admitido, y modificando de esta forma la potencia de la turbina, ajustándose en lo posible a las variaciones de carga de la red.

**Figura 35. El distribuidor**



Mecanismo regulador de la velocidad, gradúa la apertura de los alabes móviles. Este mecanismo lo han operado manualmente lo que ocasiona una inconsistencia para sostener la frecuencia.

### 3.3 Caracterización del equipo existente:

**Turbina tipo Francis, Marca JM VOITH.**

#### 3.3.1 Ficha técnica identificación Nombre: **PLANTA Zunil II**, Zunil, Quetzaltenango Guatemala Centro América. **Año 1955.** **Característica de la Turbina.**

| Unidad                   | Datos Placa: | Operación: |
|--------------------------|--------------|------------|
| Tipo:                    | Francis      |            |
| No. de Serie (Placa)     | 15388        |            |
| Fabricante               | JM VOITH     |            |
| Año de Fabricación       | 1,953        |            |
| Velocidad en (RPM)       |              | 600 rpm    |
| Potencia (HP)            |              | 1,250 KW   |
| Eje(horizontal/Vertical) | Horizontal   | Horizontal |

#### 3.3.2 Características del Generador.

| Unidad                | No. 1              | Valores de Operación |
|-----------------------|--------------------|----------------------|
| No. De Serie (Placa)  | 594764             |                      |
| Fabricante            | ELIN               |                      |
| Año de Fabricación    |                    | 1,946                |
| Velocidad (RPM)       |                    | 600                  |
| Capacidad (KVA)       |                    | 1,250 KVA            |
| COSy                  | 0.8                |                      |
| Voltaje               |                    | 2,400                |
| Número de Fases       |                    | 3                    |
| Temperatura de Diseño | 40 <sup>0</sup>    |                      |
| Tipo de Enfriamiento  | Auto refrigeración |                      |
| Protecciones          | Eléctricas         |                      |

**Tubería L: 264.50 m. H: 28.50 m. diam. Tub. 1.41 m. Q: 2.2 m<sup>3</sup>/seg.**

### **3.4 Especificación del equipo a sustituirse en la instalación existente y dimensiones de los componentes del nuevo equipo mecánico.**

En función de lo expuesto en los anteriores numerales se define que el equipo que actualmente existe es obsoleto ineficiente y de un modelo muy antiguo. Operar con este equipo aunque se repare, no es la opción más conveniente dado que por la antigüedad del equipo los repuestos están descontinuados y de esta manera no se puede garantizar la calidad de la energía a proveer ni la eficiencia.

#### **3.4.1 Por estas razones se propone lo siguiente:**

- 1.- La construcción de una nueva casa de maquinas adyacente a la existente en la cual se incluyan los siguientes cambios.
- 2.- Cambio del alineamiento del eje de la tubería de presión respecto del eje de la turbina. Ubicando este último perpendicular al de la tubería evitando el codo de 90 grados que actualmente causa perdidas de energía de presión.
- 3.- Sustitución de la tubería de presión por una que pueda contener más caudal.
- 4.- Cambio completo de la turbina y sus sistemas auxiliares.
- 5.- Sustitución de los paneles de control.
- 6.- Automatización de las compuertas de alimentación, la compuerta en sitio de presa y la de alimentación.
- 7.- Cambio del sistema de operación de las compuertas auxiliares.
- 8.- Implementación de un sistema de comunicación para informar en tiempo real sobre las operaciones de la planta a la administración.
- 9.- Cambio del equipo electromecánico de transformación auxiliar.
- 10.- Implementación de un sistema de tierras físicas para la casa de máquinas y la protección en general de los equipos.

11.- La extensión de la casa de máquinas existente:

Esta opción incluye remover el macizo de concreto que existe cambiándolo de configuración estructural y ubicando el eje del par la Turbina- Generador perpendicular al eje del tubo de presión a fin de minimizar las pérdidas de tipo hidráulico, en esta opción se aprovecha parte de la casa de máquinas existente y se debe cambiar el sentido del marco grúa, al ser reemplazado con una nueva estructura. La desventaja de esta opción es que la conformación del cambio de geometría puede no ser típica o causar la necesidad de un diseño incongruente de la obra civil.

### **3.5. Dimensionamiento de los equipos.**

La base para el dimensionamiento de los equipos es la medición de las variables de caudal y altura disponibles en el emplazamiento hidráulico en cuestión.

En la condiciones que se encuentra la instalación hidráulica de obras de conducción y considerando la ubicación de la casa de máquinas existente, la altura aprovechable es de 27.71 metros y el caudal de diseño es de  $2.00 \text{ m}^3/\text{s}$ . (95% del tiempo)

Con estos datos la potencia por obtener es de 443.36 KW.

El caudal de operación supera en mucho este calculo dado que se emplea la instalación con un factor de planta de 0.71 y el caudal que se usa es de  $3.89 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Estimando la tubería de 4.5 metros de perímetro y diámetro de 1.43 a sección llena.

Con estas condiciones puede generarse 862.0 Kw. Es decir que con estas aproximaciones la instalación nunca ha generado la potencia nominal de las máquinas existentes.

Por esto la opción para mejorar el nivel de potencia a generar es hacer la cámara de presión más arriba y lograr de esta manera un diferencial de alturas más grande.

Según el levantamiento topográfico se puede usar como referencia la cota 499.00 para elevar el nivel de la cabeza hidráulica a 30.2 metros con esto se puede generar 939.8 KW.

Esta potencia sería la máxima posible de obtener con las condiciones constructivas actuales.

Dado que una modificación de obra civil muy grande no sería rentable ni viable la opción más viable es optimizar al máximo el emplazamiento existente homologando la sección del canal ya que esta es una limitación para la obtención de una uniformidad del caudal de alimentación.

El régimen de operación de la instalación hidroeléctrica ha sido variable, aunque la capacidad instalada estaría capacitada para generar en condiciones óptimas 1,200 KW. Según las placas de los equipos.

Los registros de al menos 4 años indican un máximo de generación de 780 KW. En la hora pico y una generación de 450 KW en horas de trabajo continuo de baja demanda.

Por tanto, teniendo en cuenta este escenario de la evolución del proyecto es recomendable se defina un régimen de operación estable, en el cual se considere la producción óptima del emplazamiento y se tome con seriedad el valor económico del recurso ya que con los largos lapsos de tiempo que no opera la instalación se genera un costo de oportunidad cuantioso, ya que no se generaría energía durante ese tiempo. Por esto es necesario hacer una reposición total del equipo existente y también modificar la visión del aspecto administrativo, a fin de garantizar con un programa de mantenimiento eficaz la permanencia de la instalación.

Teniendo en cuenta esto se pueden plantear dos opciones para la sustitución del equipo mecánico existente.

- 1.- Sustituyendo el existente y conservando la misma instalación de tubería de presión con el confinamiento final con codo a 90 grados.
- 2.- Cambiando la ubicación de la casa de máquinas, eliminando el codo a 90 grados y elevando la cabeza hidráulica de la tubería.

### **3.6. Especificación general del equipo electromecánico**

Estas especificaciones se enmarcan al tipo de componentes que debe tener la planta y podrán ser utilizadas para la selección del equipo a un proveedor que satisfaga los requerimientos y para el planteo de los términos de referencia para el requerimiento de dicha maquinaria y sistemas conexos.

#### **3.6.1. Turbina Hidráulica.**

- Descripción:

Número de Unidades 01 Francis horizontal

#### **Datos:**

HL Caida neta 30.2 metros

Q Caudal de trabajo 3.80 m<sup>3</sup>/s

Potencia nominal unitária, 01 turbina. KW 1.000

H, Rendimento turbina:

| Q    | %    | KW    |
|------|------|-------|
| 100% | 91,0 | 1.097 |
| 90%  | 92,0 | 998   |
| 80%  | 91,5 | 882   |
| 70%  | 89,8 | 757   |
| 60%  | 87,0 | 629   |
| 50%  | 83,9 | 505   |

Rotación Nominal de Turbina 1,200 RPM.

### 3.6.2. Sistemas agregados a la Turbina:

- Regulador velocidad digital con Unidad Hidráulica.
- Sistema de lubricación para los cojinetes de la turbina.
- Cojinetes guía y secundario.
- Trocador de calor.
- Volante de Inercia.
- Válvula tipo Mariposa.

### 3.6.3. Generador:

Generador Sincrónico Trifásico, tipo industrial, sistema de excitación BRUSHLESS (SIN escobillas), con carcasa de chapas de acero, eje de acero ABNT 1040/45, aislamiento clase "H" (180°C), rotación sentido horario, fabricación conforme prescripciones de las normas ABNT, IEC y VDE, con las siguientes características:

**– 1000 KW – 1200 RPM – 480 V:**

Cantidad .....: 1

Modelo .....: GPA 450MI22

Carcasa .....: 450

Potencia.....: 1000 KW

Número de Polos ..... : 06 (1200 rpm)  
Velocidad de Embalamiento ..... : 1,8 x VN (2160 RPM)  
Tensión Nominal..... : 480 V  
Frecuencia Nominal. : 60 Hz  
Factor de Potencia... : 0,8  
Grado de Protección : IP-23  
Método de Enfriamiento : Abierto  
Forma Constructiva... : B3  
Excitación ..... : Brushless (PMG)  
Construcción..... : Horizontal  
Régimen de Operación : S1  
Clase de Aislamiento: F  
Elevación de Temperatura : 105°C  
Cojinetes Tipo ..... : Rodamientos  
Enfriamiento de los Cojinetes : Natural  
Ambiente..... : 40°C al 1000m  
Empuje Radial Normal : 0 kN  
Empuje Axial Normal: 0 kN  
Panel de excitación, protección y control.



### **3.7 Equipo nuevo a instalar**

#### **OPCIÓN 1: CAMBIOS A LA CASA DE MÁQUINAS**

##### **3.7.1. Red de distribución**

Red de distribución 2.4 kV (falta de mantenimiento): Es necesario considerar en este punto dos alternativas que consisten.

- 1) En dar mantenimiento a esta red, cambiando postes de madera que están muy deteriorados, sustituir transformadores de distribución y darle mantenimiento a los que se encuentran en mejor estado, cambiar el conductor existente que en muchos lugares no es adecuada su conexión, así mismo hay que cambiar las acometidas que también en algunos casos son muy antiguas.
- 2) Que la red existente en 2.4 kV cambiarla por una red de 13.8 kV esto debido a los transformadores de distribución de 2.4 kV no se fabrican como se hacían antes y prácticamente este voltaje para la distribución está prácticamente desaparecido, por lo que resultaría correcto desde el punto de vista operativo cambiar el voltaje de distribución. Esta situación también facilitaría la red ya que mantendría toda la red existente a un mismo voltaje.

##### **3.7.2. Red de distribución (nueva sin terminar y en construcción) 13.8 kV que va Cantel energizada en 2.4 kV.**

Esta red es necesario terminarla ya que por falta de fondos se suspendió su construcción.

### **3.7.3. Subestación de entrada**

1. Interruptor de 13.8 kV.
2. Medición para venta de energía.
3. Transformadores de medición.
4. Succionadores.
5. Pararrayos.
6. Aisladores de soporte.
7. Estructuras galvanizadas para instalaciones de equipos

### **3.7.4. Casa de Máquinas**

1. Panel de mando y control.
2. Generador eléctrico de 1.25 MVA.
3. Excitatriz de estado sólido.
4. Banco de baterías.
5. Cables de potencia.
6. Cables de mando y control.
7. Transformadores para servicios auxiliares.
8. Transformadores de medición de corriente y tensión para protección de generador.
9. Regulador de velocidad.
10. Regulador de tensión.

## **OPCIÓN 2: Equipamiento de una casa de máquinas nueva adyacente a la existente**

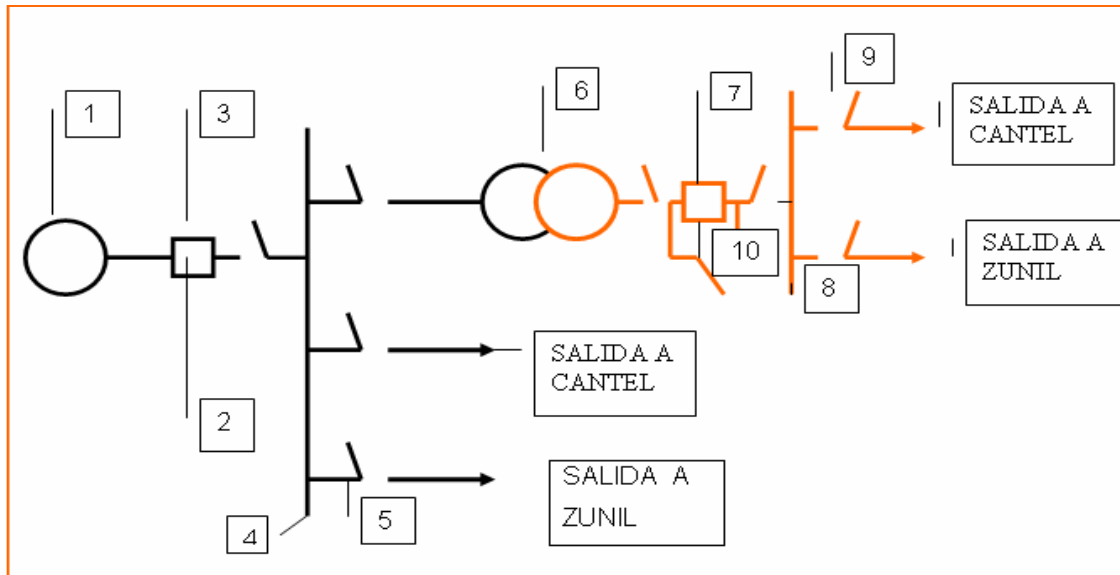
Esta opción consiste en cambiar de lugar la casa de máquinas de su lugar actual instalando nuevos equipos y abandonando la antigua casa de máquinas hacia otro punto, a continuación la lista de equipos a instalar. Con respecto a la subestación sería los mismos equipos de la opción 1 y las mismas consideraciones para red de distribución.

1. Panel de mando, control y protección.
2. Generador eléctrico de 1.25 MVA.
3. Excitatriz de estado sólido.
4. Banco de baterías.
5. Cables de potencia.
6. Cables de mando y control.
7. Transformadores para servicios auxiliares.
8. Transformadores de medición de corriente y tensión para protección de generador.
9. Regulador de velocidad.
10. Regulador de tensión.

### 3.8. Diagrama de Flujo

- Configuración actual
- Configuración futura

Figura 36. Diagrama de flujo



1. GENERADOR 1.250 kVA
2. INTERRUPTOR DE MÁQUINA 2.4 kV
3. SECCIONADOR DE MÁQUINA 2.4 kV
4. BARRA 2.4 kV
5. CORTACIRCUITOS DE SALIDA 2.4 kV
6. BANCO DE TRANSFORMACIÓN DE 1.5 kVA 2.4/ 13.8 kV
7. INTERRUPTOR DE 13.8 Kv
8. BARRA 13.8 Kv
9. CORTACIRCUITOS DE SALIDA 13.8 kV
10. SECCIONADORES DE INTERRUPTOR. 13.8 kV

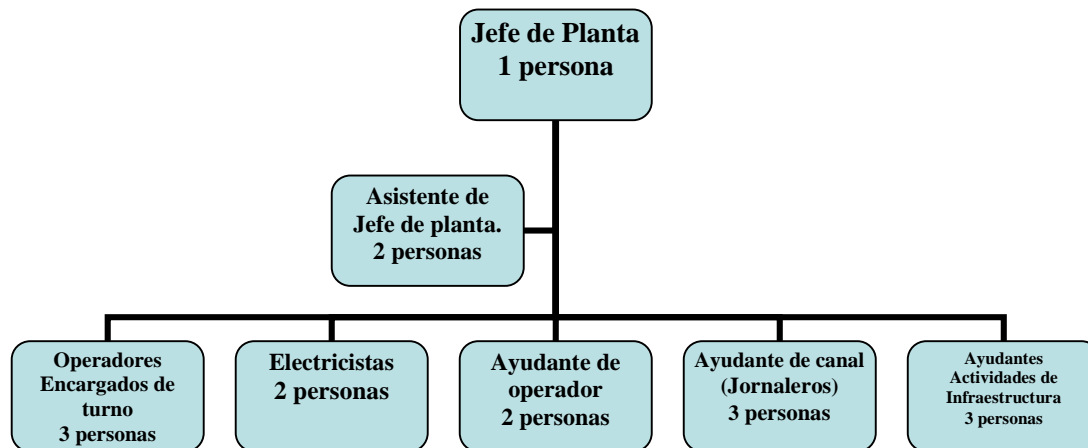
### 3.9. Organigrama propuesto.

Dado el tamaño de la instalación, debe tener límites para el número de personas que la operen, pues será más rentable y la tendencia en la operación de las plantas modernas es minimizar el personal operativo al implementar sistemas de control automatizados.

Por otro lado la administración de esta hidroeléctrica, está regida por regulaciones que se generan en la Empresa Eléctrica Municipal de Quetzaltenango y esta se rige por disposiciones del marco legal Municipal; Siendo uno de sus lineamientos el Pacto Colectivo, acuerdos que definen la permanencia de determinados puestos y sus condiciones para su remoción o cambios dentro de la estructura Municipal.

Dada esta condición se sugiere reubicar a las personas que laboran en la instalación y que están afectas a este amparo, a fin que su permanencia sea productiva y se tenga un provecho de su trabajo.

**Figura 37. Organigrama propuesto**



Organigrama del personal a trabajar en el nuevo proyecto. Propuesta resultado del presente estudio.

## CONCLUSIONES

1. En el mantenimiento de maquinaria es imprescindible contar con los catálogos y manuales de estas; para que la revisión y servicio se realice bajo el amparo de las recomendaciones de los fabricantes.
2. La actividad de mantenimiento es eficiente si se utiliza, tanto la herramienta como el personal adecuado. De tal manera que el deterioro de la maquinaria se puede ver favorecido por el uso de medios inapropiados para el fin que se persigue.
3. El desgaste natural que presenta la turbina, representa una baja en su eficiencia, dado al incremento de pérdidas hidráulicas y volumétricas. Esta baja en la eficiencia se consideró para poder determinar la potencia que para su estado actual puede ofrecer.
4. El deterioro del regulador de velocidad incurre a un incremento de la insensibilidad de este aparato, afectando de esta manera, la eficiencia de la turbina y en el mal funcionamiento del generador eléctrico, si este deterioro es elevado.
5. cada elemento de máquina posee sus características propias. Los cojinetes por su parte son elementos bastante precisos y, relativamente robustos que de un 70% - 80% de sus fallas prematuras se deben a mal montaje y desmonte; como de una lubricación defectuosa.
6. Los equipos en servicio y reparación deben ser sometidos a verificaciones y pruebas dentro del taller durante la secuencia de ensamble y cuando éstos se encuentran totalmente armados. Garantizando de esta manera, el correcto funcionamiento de la

mini-hidroeléctrica en su lugar de instalación, ya que en sitios como el último mencionado, no se cuenta con los medios adecuados para hacer correcciones en el funcionamiento de algún elemento que presente problemas.

7. Un proyecto de diseño no es mejor si presenta costos elevados. Un proyecto es eficiente si se encuentra un punto común de equilibrio entre seguridad, economía y buen funcionamiento.
8. Que esta planta, a pesar de los descuidos en su mayor parte administrativos, ya lleva medio siglo de buen trabajo y que, en realidad, con poco se le puede remozar para llevarla de nuevo a lo original y un poco más, con una inversión relativamente baja.
9. Que el equipo turbogenerador actual, aun remozándolo sólo puede llegar a cerca de 0.9 MW mientras que con equipo nuevo se va estar en el orden de los 1.4 MW, esto es cerca de un 56% arriba, y en términos monetarios esto estaría de la siguiente manera: con los 1.4 MW se va a estar en las cercanías de los Q7 millones por año, con .09 MW se estaría en las cercanías de los Q4.5 millones por año, una diferencia a favor del nuevo equipo de Q2.5 millones por año.
10. El desgaste del rodete lo que normalmente se tiene que rehacer cada par de años y que resulta relativamente caro—se debe principalmente a la cavitación y no a la abrasión como comúnmente se ha creído.

## **RECOMENDACIONES**

### **AL JEFE DE MANTENIMIENTO**

1. Consultar los manuales de mantenimiento, cuando se proporciona servicio a la maquinaria, para que las verificaciones y disposiciones que se tomen estén debidamente fundamentadas.
2. Hacer uso de los métodos, equipos, personales, y herramientas adecuadas para todas las actividades que involucren mantenimiento, para garantizar el servicio y prevenir posibles accidentes.
3. Examinar exhaustivamente cualquier elemento dañado para encontrar la causa y de ser posible eliminarla.
4. Tomar las medidas de seguridad necesarias en el manejo de solventes y materiales utilizados en la limpieza y pintura, para prevenir accidentes.
5. Hacer uso del lubricante adecuado, cantidad adecuada que lubrique un elemento, periodicidad y puntos adecuados. Para evitar daños al mismo por mala lubricación.

### **AL JEFE DE LA PLANTA**

6. Indagar exhaustivamente, en el mercado nacional, la existencia y costo de los elementos a emplear de manera que la tarea de selección y diseño de cualquier proyecto este bien documentado.
7. Si por las condiciones de un problema de diseño, los métodos numéricos no conducen a resultados concretos, es recomendable abocarse a personas expertas en la materia, para que, mediante su experiencia, pueda aportar los criterios necesarios. Para mejor aprovechamiento de los recursos.



8. Ya no seguir haciéndole reparaciones ni rehaciendo el equipo hidrogenerador actual debido a: que su tecnología es antigua y su eficiencia esta alrededor de un 50% de un equipo moderno. Por lo que solo se puede generar 0.9 MW es decir 0.5 MW debajo de un equipo nuevo. Que representa cuatro millones y medio de quetzales al año, que deja de percibir.

**AL CONSEJO MUNICIPAL DE QUETZALTENANGO.**

9. Hacer de la EEMQ una entidad autónoma y preferiblemente de capital mixto, para que se puede dedicar a ejercer sus tareas sin la intromisión de problemas que intrínsecamente no le deberían afectar. Para que los fondos se inviertan en mejora del equipo y servicio y no sean trasladados a otras partidas fuera de la misma.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BARRIOS ORTEGA, Víctor Hugo.  
Generalidades sobre minihidroeléctricas, elementos a considerar en la energética futura de Guatemala. (Tesis Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala), 1985, pp.156
2. Electrical Machines, Seely, Ed. MacGraw–Hill/Kogakusha. 1992, pp. 52
3. [www.Wikipedia.com](http://www.Wikipedia.com) (28 de mayo de 2007)
4. L. Ron Hubbard, Investigaciones (La Serie de Datos) de, Managment Series. Editorial Bridge Publications. 1980, pp. 25
5. L. Ron Hubbard, Metas y objetivos, Managment Series. Editorial Bridge Publications. 1985, pp. 32
6. L. Ron Hubbard, Los Fundamentos de la Organización, Ed. Bridge Publications. 1980, pp. 69
7. Máquinas Eléctricas, Kostenko y Piotrov, Ed. MIR. 1970, pp. 62
8. KOENIGSBERGER. Rodolfo. Ingeniería eléctrica II. 4ta. Edición.  
1992, pp. 67
9. Pelton Waterwheels, Manual de Instalaciones de Turbinas Pelton.  
1 1ª Edición. 1909, pp. 67
10. Mataix, Claudio. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Segunda Edición. Mexico: Edit. Harla, 1985, pp 156