



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Implementación de Procedimiento de Inspección y Reparación de  
Rodetes de la Turbina Francis de una Central Hidroeléctrica”

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

(Proyecto de Graduación)

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

Ronald Joel Allauca Romero

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2015

## **AGRADECIMIENTO**

Al Ing. Ernesto Martínez,  
Director de mi proyecto de  
graduación, por su invaluable  
guía, colaboración y tiempo  
prestado en la realización y  
culminación de este trabajo.

Al Ing. Gonzalo Altamirano  
por su ayuda de manera  
desinteresada

A las personas que siempre  
estuvieron apoyándome para  
que siga adelante en la  
carrera que elegí.

## DEDICATORIA

A mis padres que en todo momento han estado presentes animándome a seguir adelante, a mis hermanos, mi familia y a Liss por todo el apoyo y la ayuda brindada para la culminación de este trabajo.

# TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

Ing. Jorge Duque R.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

---

Ing. Ernesto Martínez L.  
DIRECTOR DEL TFG

---

Ing. Omar Serrano V. VOCAL

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido desarrollado en el presente Trabajo Final de Graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

Ronald Joel Allauca Romero

## RESUMEN

En el país existen varias centrales hidroeléctricas, las mismas que usan el agua para la generación de energía con la ayuda de turbinas hidráulicas. Dentro de las unidades de generación de energía hidráulica se tiene como parte fundamental el rodete; que es el que transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Esta pieza está sometida a fenómenos como la corrosión, cavitación y erosión; que producen un desgaste en la superficie del mismo.

A pesar de los mantenimientos predictivos que se realizan en las centrales hidroeléctricas para prevenir que el rodete no sufra daños relevantes, debido al desgaste se debe ejecutar un mantenimiento correctivo para la recuperación total del mismo una vez desmontado. Esta reparación se realiza en el exterior y no siempre se obtiene buen resultado, luego de poner en reparación el rodete, se busca ahorrar costos en la reparación de los rodetes en el exterior por lo que se analiza realizar la reparación localmente y garantizar la correcta reparación.

Es por esto, que nace la idea de elaborar un procedimiento completo de inspección y reparación de rodetes Francis no solo para la central hidroeléctrica que es el tema de estudio sino también para otras centrales del país que tienen el mismo problema y que se ahorraría un porcentaje del costo de repararlas fuera del país, más aun no tener que adquirir un nuevo rodete.

Para poder efectuar la reparación de los rodetes se necesita el diseñar un taller industrial donde se puedan llevar los rodetes de las diferentes centrales hidroeléctricas del país y realizar la recuperación total de los mismos.

Luego de realizar el análisis correspondiente a los diferentes tipos de trabajo que deben ejecutar se seleccionó los equipos requeridos, se realizó la distribución de planta adecuada y se elaboraron los procedimientos a cumplir en la reparación, durante la ejecución de la reparación se incluyen pruebas y controles para garantizar el trabajo efectuado.

Se determina el tamaño adecuado del taller, se suministra un listado de equipos y personal requerido; así como un presupuesto referencial.

El proyecto es viable, la inversión inicial es de \$ 3.528.150,62 que se recupera en 6 años, el TIR es de 26% y el VAN \$ 3.203.478,35.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN .....	ii
ÍNDICE GENERAL .....	iv
ABREVIATURAS .....	vi
SIMBOLOGÍA .....	vii

ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE PLANOS .....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO 1</b>	
1.GENERALIDADES .....	5
1.1. Generación de Energía Eléctrica .....	5
1.2. Tipos de generación eléctrica .....	12
<b>CAPÍTULO 2</b>	
2.CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL ECUADOR .....	31
2.1. Descripción de la Central Hidroeléctrica .....	32
2.2. Turbina Francis y sus características técnicas .....	36
2.3. Mantenimiento de la turbina Francis .....	46
<b>CAPÍTULO 3</b>	
3.RODETES DE UNA TURBINA FRANCIS .....	51
3.1. Inspección del rodete .....	53
3.2. Opciones para la reparación del rodete Francis .....	58
<b>CAPÍTULO 4</b>	
4.IMPLEMENTACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN Y REPARACIÓN .....	65
4.1. Diseño de un taller industrial para reparación de rodete .....	65
4.2. Proceso de reparación del rodete .....	77

**CAPÍTULO 5**

5.ANÁLISIS ECONÓMICO .....	105
5.1. Presupuesto para la implementación del taller industrial .....	105
5.2. Evaluación de la inversión .....	105

**CAPÍTULO 6**

6.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	112
--	-----

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

**ABREVIATURAS**

CONELEC Consejo Nacional de Electricidad

CELEC EP Corporación Eléctrica del Ecuador Empresa Publica

UV Ultra violeta

ISO International Organization for Standardization (Organización  
Internacional de Normalización)

ASTM American Society for Testing and Materials

VAN Valor Actual Neto

TIR Tasa Interna de Retorno

## SIMBOLOGÍA

°C:	Grado centígrado
°F:	Grado Fahrenheit
mm:	Milímetro
cm:	Centímetro
m:	Metro
m <sup>2</sup> :	Metro cuadrado
m <sup>3</sup> :	Metro cúbico
In:	Inch (pulgada)
m.s.n.m:	Metros sobre el nivel del mar
Kg:	Kilogramo
Kgf:	Kilogramo Fuerza
GWh:	Gigavatio hora
T:	Tonelada
rpm:	Revoluciones sobre minutos
psi:	Libras sobre pulgadas al cuadrado
g/cm <sup>3</sup> :	Gramos sobre centímetro cúbico
kg/m <sup>3</sup> :	Kilogramos sobre metros cúbicos
kg/h:	Kilogramos sobre hora
gpm:	Galones por minuto
cfm:	Cubic feet per minute (pies cúbicos sobre minutos)
Km <sup>2</sup> :	Kilómetros cuadrados
V:	Voltios
KW:	Kilowatts
Ø:	Diámetro
%	Porcentaje

**ÍNDICE DE FIGURAS ..... iv**

Figura 1.1	Centrales en operación de CELEC EP .....	7
Figura 1.2	Evolución de la capacidad instalada de CELEC EP .....	7
Figura 1.3	Producción de energía en Ecuador por tipo de central (GWh) – 2012 .....	8
Figura 1.4	Energía generada por CELEC en el año 2013 .....	9
Figura 1.5	Evolución matriz energética de Ecuador .....	9
Figura 1.6	Esquema General de Obras .....	10
Figura 1.7	Esquema de planta térmica .....	14
Figura 1.8	Esquema de una planta geotérmica .....	16
Figura 1.9	Esquema de una central de energía nuclear .....	18
Figura 1.10	Esquema del aprovechamiento de la energía de la marea.....	20
Figura 1.11	Esquema de una central eólica .....	22
Figura 1.12	Esquema de una central solar térmica .....	24
Figura 1.13	Esquema de una Central Hidroeléctrica .....	27
Figura 2.1	Selección de Turbina Hidráulica .....	36
Figura 2.2	Rendimiento turbina Francis.....	37
Figura 2.3	Elementos de una turbina.....	38
Figura 2.4	Cámara espiral de una turbina Francis.....	39
Figura 2.5	Distribuidor y alabes móviles de la turbina Francis.....	40
Figura 2.6	Rodete de Turbina Francis .....	42
Figura 2.7	Funcionamiento de Turbina Francis .....	44
Figura 4.1	Amoladora angular de alta frecuencia .....	67
Figura 4.2	Rectificadora recta de alta frecuencia.....	67
Figura 4.3	Herramientas para pulido .....	68
Figura 4.4	Torno vertical.....	69
Figura 4.5	Kit de tintas penetrantes .....	70
Figura 4.6	Yugo usado para la inspección por partículas magnéticas.....	71
Figura 4.7	Lámpara UV y polvos para inspección de partículas magnéticas .....	71

Figura 4.8	Modelo de puente grúa.....	72
Figura 4.9	Modelo de Sistema de Balanceamiento estático .....	74
Figura 4.10	Levantamiento de archivo fotográfico .....	78
Figura 4.11	Plantillas del rodete .....	79
Figura 4.12	Desgastes admitidos en las partes del rodete .....	83
Figura 4.13	Uso de plantillas y control dimensional.....	84
Figura 4.14	Aplicación de líquidos penetrantes .....	89
Figura 4.15	Apertura de discontinuidades .....	89
Figura 4.16	Inspección por partículas magnéticas.....	93
Figura 4.17	Uso de las amoladoras y rectificadoras .....	97
Figura 4.18	Pulido del laberinto de la corona .....	97
Figura 4.19	Calentamiento y soldadura de rodete Francis .....	103
Figura 4.20	Rodete en el torno vertical.....	105
Figura 4.21	Rodete ingresando al horno de tratamiento térmico .....	107

Pág.

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.	
Tabla 1	Unidades de Negocio de Celec Ep .....	7
Tabla 2	Tipos de Centrales Eléctricas .....	12
Tabla 3	Tipos de Centrales Eléctricas .....	16

Tabla 4 Centrales Hidroeléctricas del Ecuador .....	32
Tabla 5 Datos Técnicos de la Presa .....	35
Tabla 6 Características del Canal de Desvío y Limpieza de la Presa .....	35
Tabla 7 Características de la Ataguía Permanente .....	36
Tabla 8 Características Técnicas de la Turbina Instalada en la Central ...	43
Tabla 9 Plan de Mantenimiento para el Generador .....	49
Tabla 10 Plan de Mantenimiento para la Turbina .....	49
Tabla 11 Cuadro Comparativo de Opciones de Reparación para un Rodete Francis .....	63
Tabla 12 Características de los Materiales para Soldadura Tig y Gtaw .....	67
Tabla 13 Descripción de las Amoladoras Industriales de Alta Frecuencia ..	67
Tabla 14 Características de Amoladoras y Rectificadoras .....	68
Tabla 15 Características del Torno Vertical .....	70
Tabla 16 Características del Eje Rodante .....	75
Tabla 17 Inversión Inicial .....	106
Tabla 18 Depreciación de Maquinaria y Construcción Anual .....	107
Tabla 19 Payback .....	110

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1.	Distribución de áreas del taller industrial.
Plano 2.	Soportes para reparación de rodetes.
Plano 3.	Sistema de Balanceamiento estático de barras paralelas.



# INTRODUCCIÓN

En el capítulo 1 se describirán las generalidades del sector eléctrico; donde se explica el proceso de la generación de energía eléctrica, se mencionarán las centrales de generación del Ecuador que se encuentran en operación y los proyectos emblemáticos en ejecución que han ayudado a la evolución de la matriz energética del país. Se analizarán también los diferentes tipos de generación eléctrica y el aprovechamiento de las fuentes de energía. En el capítulo 2 se detallarán las centrales hidroeléctricas más importantes del Ecuador, se describirá la central objeto de este estudio. Adicionalmente se puntualizará en la turbina Francis, la misma que opera en la central; sus componentes principales, características técnicas y el control de mantenimientos que tiene.

En el Capítulo 3, se profundizará en el rodete de la turbina, que es parte fundamental de las unidades de generación de una central hidroeléctrica, es el corazón de una turbina en este caso de la tipo Francis.

El rodete está conectado a un eje y este último al generador, que es el que transforma la energía mecánica (resultado de la energía cinética, energía de presión y energía potencial) en energía eléctrica.

Los rodetes están sometidos principalmente a dos fenómenos que son la erosión y cavitación, esto se debe a que el agua de río que ingresa a la turbina no es limpia y trae consigo piedras que provocan el desgaste en la superficie del rodete. El desgaste que se produce conlleva a una disminución en la

generación de energía eléctrica, lo cual significa que los rodetes no están trabajando con una eficiencia máxima, por ende necesitan ser reparados.

Para la reparación de los rodetes Francis, la central hidroeléctrica los envía fuera del país. Sin embargo, cuando los rodetes retornan a la central para retomar su funcionamiento se verifican considerables pérdidas de eficiencia en la generación. A partir de este problema, se genera la necesidad por parte de los administradores de la central de verificar el porqué de las pérdidas en la generación de energía. Se decide consultar a un experto en turbinas hidráulicas y se determina que las reparaciones hechas en el exterior no son realizadas de manera correcta. Las superficies del rodete deberían quedar planas y lisas, sin embargo se encuentra que hay irregularidades.

No obstante, un taller no es suficiente también se debe poseer los conocimientos técnicos para llevar a cabo una reparación total de los rodetes. Se necesita de un procedimiento que sirva de guía y referencia. Lo que el presente estudio pretende es la elaboración de un procedimiento para la reparación de los rodetes Francis, en este capítulo como preámbulo al desarrollo del mismo se establecerá un diagrama de flujo que permita visualizar de manera general todos los procesos de una reparación de rodetes Francis.

La metodología a seguir será la realización de una investigación exploratoria para poder generar conocimientos que ayuden a definir cuál es la situación del problema que presenta la Central Hidroeléctrica

Para poder profundizar en el tema se utilizarán recursos tales como revisión literaria y asesoramiento especializado. Para la revisión bibliográfica se utilizarán manuales de procedimientos, libros e investigaciones que contengan información relevante sobre el tema a desarrollar. La formulación de entrevistas exhaustivas se realizará tanto a un experto de categoría internacional con años de experiencia que ha ejecutado reparaciones en centrales hidroeléctricas de diferentes partes del mundo, y a diferentes técnicos involucrados de la central que realizan los mantenimientos y que tienen noción sobre el tema porque han participado de manera parcial en las últimas reparaciones que se han llevado a cabo en el exterior.

Dados los antecedentes, en el Capítulo 4 se presentará la propuesta de construir un taller para que la Central Hidroeléctrica realice la reparación de rodets en el país, lo que permitiría no sólo la reparación de rodets de la central hidroeléctrica en estudio, sino también de los rodets del resto de centrales del país.

En el Capítulo 5 se desarrollará un análisis financiero integral del proyecto donde se elaborará el presupuesto que determine el valor total de la inversión inicial requerida para la construcción y adecuación del taller. Se realizará un análisis de costos, que servirá de base para la elaboración del flujo de caja. Posteriormente, se determinará el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto para comprobar la viabilidad y rentabilidad económica del mismo, así como también el Payback que establecerá el tiempo de recuperación de la inversión.

Finalmente en el Capítulo 6 se darán las respectivas conclusiones y recomendaciones de la elaboración de un procedimiento de inspección y reparación de rodets en el país.

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Generación de Energía Eléctrica

La producción de energía se realiza básicamente por medio de un generador, el cual varía en función del medio o energía primaria que se utiliza para que se opere el generador y así convertir la energía mecánica que impulsa al generador en energía eléctrica.

En Ecuador los agentes de generación eléctrica son clasificados en generadoras, distribuidoras con generación y autogeneradoras. Las empresas generadoras son titulares de una concesión para la explotación económica de las centrales de generación eléctrica, ya sea de cualquier tipo, para luego hacer entrega de su producción

total o parcial en uno o varios puntos, en el Sistema Nacional de Transmisión, en un sistema aislado de transporte o en una red de distribución. Dentro de este grupo, según el Informe Estadístico 2012 del CONELEC las unidades de negocios CELEC - Hidropaute y CELEC - Electroguayas son las de mayor representación con 31,20 % y el 13,36 % de la potencia instalada, respectivamente.

En este grupo de generadoras la energía hidroeléctrica representa el 50,59 % y la termoeléctrica el 49,35% de la potencia total instalada, mientras que la energía eólica solamente representa el 0,06 %.

En el Anexo A se presenta un listado de las empresas generadoras del Ecuador con sus respectivas centrales y se detalla también el tipo de energía producida por cada una.

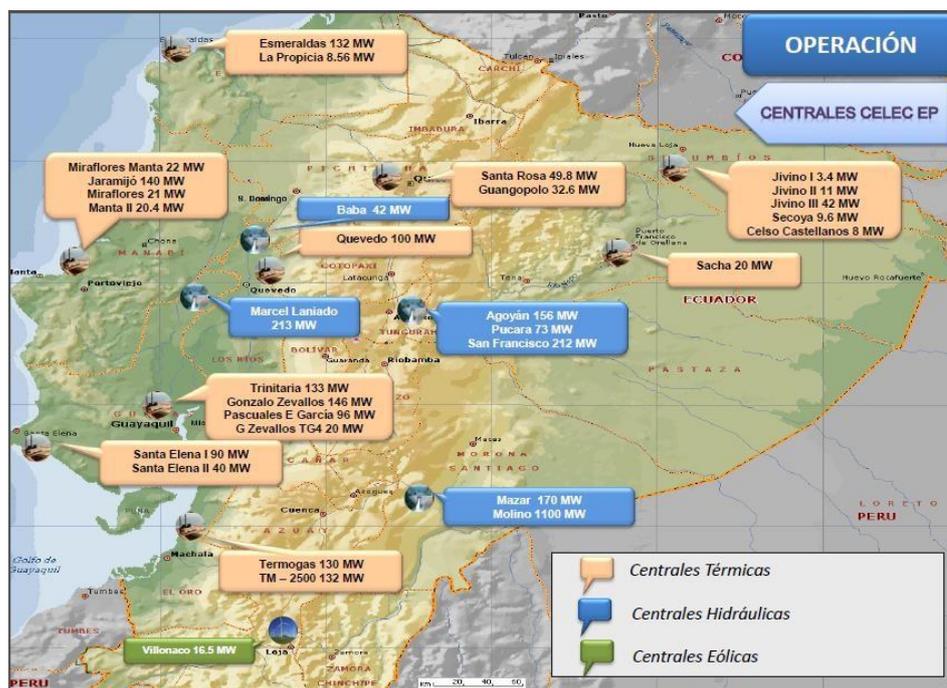
Las distribuidoras que poseen centrales de generación o generación no escindida son 11 y 25 son las empresas que se reportaron como autogeneradoras.

En Ecuador la generación de energía eléctrica del país en su gran mayoría está a cargo de la empresa pública Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP).

Las diferentes centrales de generación eléctrica del país las administra de manera más significativa CELEC EP. a través de sus Unidades de Negocio, las cuales se detallan en la Tabla 1.1:

**TABLA 1 UNIDADES DE NEGOCIO DE CELEC EP**

1	ELECTROGUAYAS
2	ENERJUBONES
3	HIDROAGOYÁN
4	HIDRONACIÓN
5	HIDROPAUTE
6	HIDROTOAPI
7	TERMOESMERALDAS
8	TERMOPICHINCHA
9	ENERNORTE
10	TERMOGAS MACHALA
11	GENSUR
12	HIDROAZOGUEZ



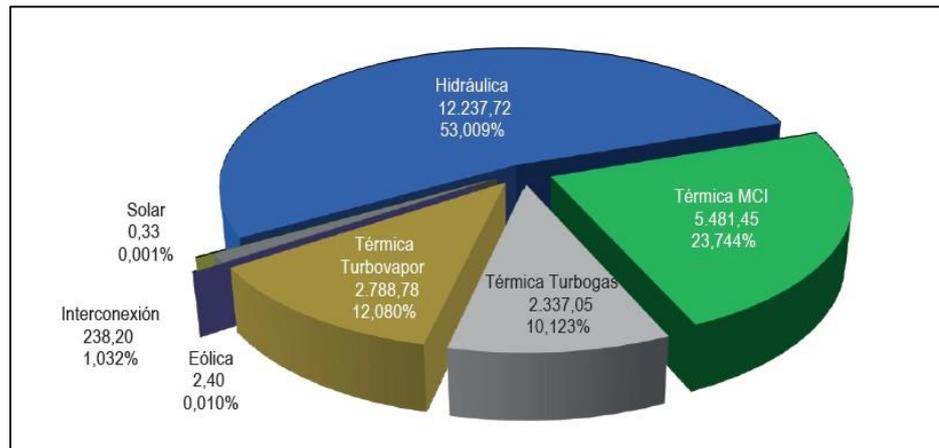
### Figura 1.1 Centrales en operación de CELEC EP [1]

La potencia instalada de CELEC EP pasó de ser de 2214 MW en el año 2009 a 3367 MW en el 2013, aumentando en un 52% aproximadamente en los últimos 5 años.



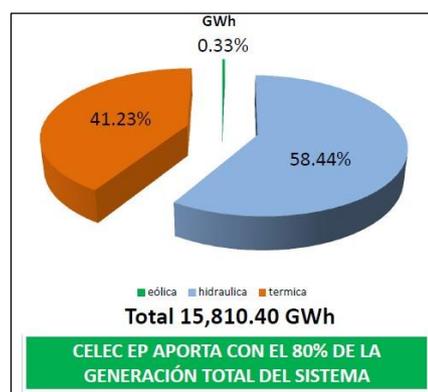
### Figura 1.2 Evolución de la capacidad instalada de CELEC EP [1]

Las autoridades estatales han recalcado la importancia que tiene para Ecuador un cambio de la matriz energética. Actualmente en el país se llevan a cabo varios proyectos que promueven una mayor participación de energías renovables y sostenibles, además de contribuir a cubrir en su totalidad la demanda energética del país.

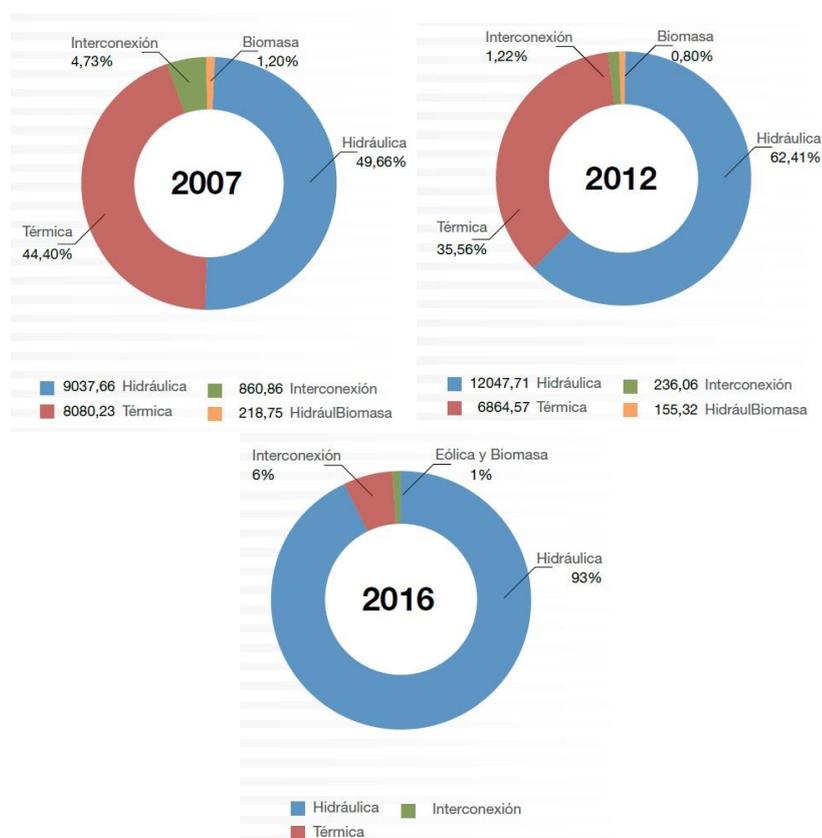


**Figura 1.3 Producción de energía en Ecuador por tipo de central (GWh) – 2012 [2]**

Dado que Ecuador aún no logra satisfacer la demanda energética total del país, se importa energía desde Colombia. Con todos los proyectos puestos en marcha, los que siguen en construcción y los que están en estudio se pretende que Ecuador consiga tener soberanía e independencia energética para el año 2016.



**Figura 1.4 Energía generada por CELEC en el año 2013 [1]**



**Figura 1.5 Evolución matriz energética de Ecuador [3]**

El Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair de 1500MW de potencia es el proyecto más grande de generación hidroeléctrica de Ecuador. Inició su construcción en Julio de 2010; el costo del proyecto es de USD 2.245 millones y su fecha de entrada en operación es en febrero de 2016. Este proyecto aprovecha el potencial de los ríos Quijos y Salado que forman el río Coca, en una zona en la que este río describe una curva en la que se presenta un

desnivel de 620 m, con un caudal medio anual de 287 m<sup>3</sup>/s aprovechables para su generación hidroeléctrica.

Coca Codo Sinclair está conformado por una Obra de captación constituida por una presa de enrocado con pantalla de hormigón, vertedero, desarenador y compuertas de limpieza que permiten transportar el caudal captado hacia el Embalse Compensador a través de un Túnel de Conducción de 24,83 km gracias a una caída de 620 m desde el embalse compensador a la casa de máquinas permitirá transformar la energía potencial en energía eléctrica a través de 8 unidades tipo Peltón de 187,5 MW cada una. El proyecto, a la fecha, presenta un avance de 71% (Septiembre 2014).



**Figura 1.6 Esquema General de Obras [4]**

## 1.2. Tipos de generación eléctrica

Las tecnologías de generación se pueden clasificar en función de la fuente de energía que utilicen, en la Tabla 1.2 se muestran los diferentes tipos de centrales de generación.

**TABLA 2**

### **TIPOS DE CENTRALES ELÉCTRICAS**

<b>Tipo de central</b>	<b>Energía que aprovecha</b>
Nuclear	Fisión del átomo
Eólica	Cinética del viento
Hidroeléctrica	Potencial del agua
Térmica	Química de combustión
Solar	Radiación Solar

En el Anexo B se presenta un mapa con las centrales de generación eléctrica de Ecuador.

### **Energía Termoeléctrica**

Una central termoeléctrica es una instalación empleada para la generación de energía eléctrica a partir de calor. Este calor puede

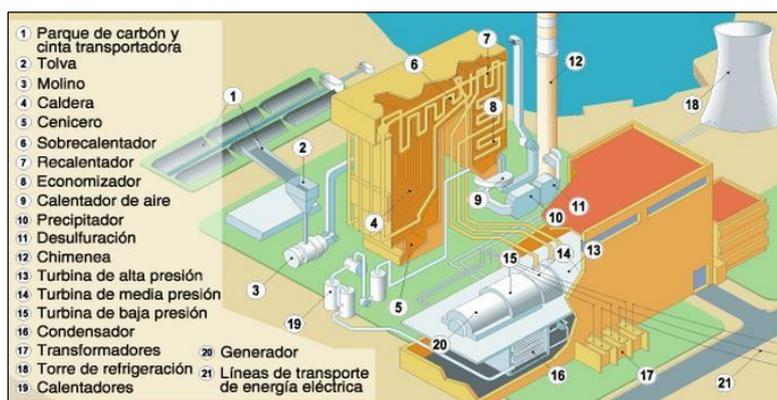
obtenerse tanto de combustibles fósiles (petróleo, gas natural o carbón) como de la fisión nuclear del uranio u otro combustible nuclear. Las centrales que en el futuro utilicen la fusión también serán centrales termoeléctricas.

En su forma más clásica, las centrales termoeléctricas consisten en una caldera en la que se quema el combustible para generar calor que se transfiere a unos tubos por donde circula agua, la cual se evapora. El vapor obtenido, a alta presión y temperatura, se expande a continuación en una turbina de vapor, cuyo movimiento impulsa un alternador que genera la electricidad. Luego el vapor es enfriado en un condensador donde circula por tubos agua fría de un caudal abierto de un río o por torre de refrigeración.

En las centrales termoeléctricas denominadas de ciclo combinado se usan los gases de la combustión del gas natural para mover una turbina de gas. En una cámara de combustión se quema el gas natural y se inyecta aire para acelerar la velocidad de los gases y mover la turbina de gas. Como, tras pasar por la turbina, esos gases todavía se encuentran a alta temperatura (500 °C), se reutilizan para generar vapor que mueve una turbina de vapor. Cada una de estas turbinas impulsa un alternador, como en una central termoeléctrica común. El vapor luego es enfriado por medio de un caudal de agua

abierto o torre de refrigeración como en una central térmica común. Además, se puede obtener la cogeneración en este tipo de plantas, al alternar entre la generación por medio de gas natural o carbón. Este tipo de plantas está en capacidad de producir energía más allá de la limitación de uno de los dos insumos y pueden dar un paso a la utilización de fuentes de energía por insumos diferentes.

Las centrales térmicas que usan combustibles fósiles liberan a la atmósfera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), considerado el principal gas responsable del calentamiento global. También, dependiendo del combustible utilizado, pueden emitir otros contaminantes como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas sólidas (polvo) y cantidades variables de residuos sólidos. Las centrales nucleares pueden contaminar en situaciones accidentales y también generan residuos radiactivos de diversa índole.



### **Figura 1.7 Esquema de planta térmica [5]**

En Ecuador, las empresas generadoras, distribuidoras y autogeneradoras de energía, en sus centrales térmicas, disponen de motores de combustión interna (MCI), unidades turbovapor o unidades turbogas, las mismas que para su funcionamiento utilizan diversos combustibles, como son: fuel oil, diésel 2, nafta, gas natural, crudo, residuo y bagazo de caña, siendo considerado este último como un tipo de biocombustible.

Las empresas azucareras Ecoelectric (a partir de junio de 2005), Ecudos (desde julio de 2005) y San Carlos (desde diciembre de 2004), emplean el bagazo de caña para obtener vapor de agua, el cual mueve las turbinas de sus generadores eléctricos. Esta generación es utilizada principalmente para abastecer sus necesidades productivas (elaboración de azúcar para el consumo humano) y luego sus excedentes son vendidos en el Mercado Eléctrico Mayorista. Por consiguiente, el bagazo de caña es utilizado únicamente en los periodos de zafra que en nuestro país generalmente están entre los meses de junio a febrero.

En la Tabla 1.3 se muestran las empresas generadoras que tienen a cargo centrales térmicas en el Ecuador.

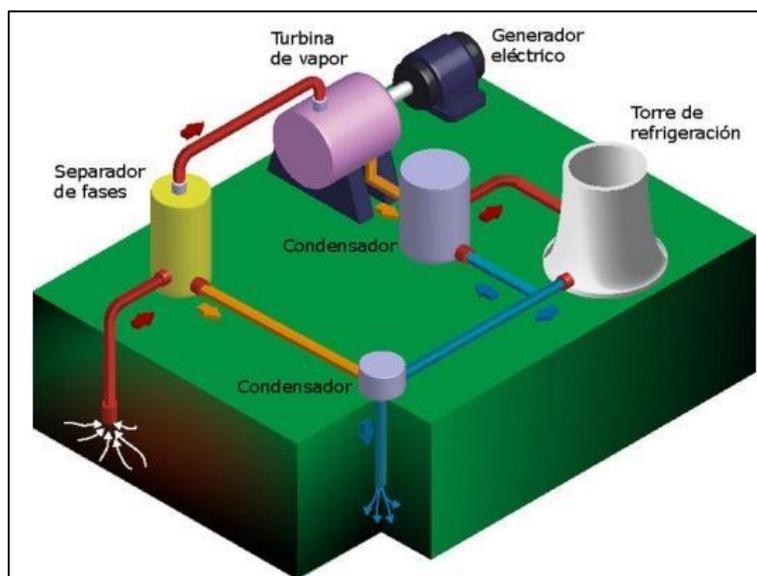
**TABLA 3****TIPOS DE CENTRALES ELÉCTRICAS [2]**

1	CELEC-Electroguayas
2	CELEC-Termoesmerladas
3	CELEC-Termopichincha
4	CELEC-Termomachala
5	Elecaastro
6	Electroquil
7	Generoca
8	Termoguayas
9	Intervisa Trade

**Energía Geotérmica**

La energía geotérmica es aquella energía que puede obtenerse mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. El interior de la Tierra está constituido por magma y materia incandescente, a una profundidad de aproximadamente 6370 Km, se tiene un promedio de temperaturas cercano a 4500°C. Dado que la superficie es mucho menor, este calor tiende a salir hacia la superficie en forma natural. Sin embargo, el calor se sigue produciendo al interior de la Tierra por reacciones nucleares. Las erupciones volcánicas, géiseres, lagunas calientes, volcanes de lodo o manantiales de aguas termales son prueba de este flujo de

calor [6].



**Figura 1.8 Esquema de una planta geotérmica [6]**

Se obtiene energía geotérmica por extracción del calor interno de la Tierra. En áreas de aguas termales muy calientes a poca profundidad, se perfora por fracturas naturales de las rocas basales o dentro de rocas sedimentarias. El agua caliente o el vapor pueden fluir naturalmente, por bombeo o por impulsos de flujos de agua y de vapor (flashing). El método a elegir depende del que en cada caso sea económicamente rentable.

### **Energía Nuclear**

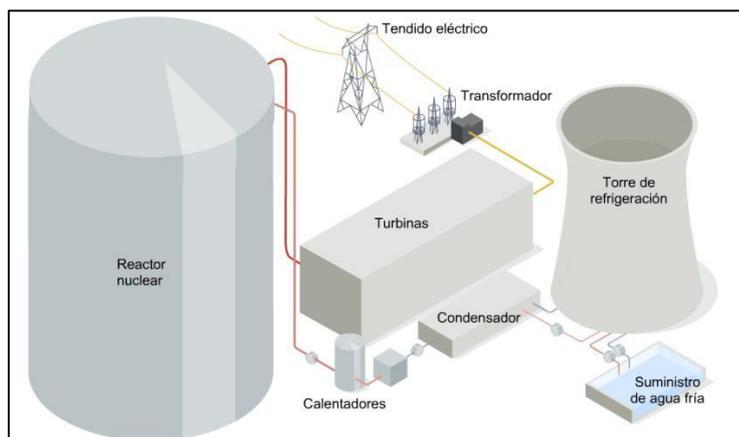
Una central nuclear es una instalación industrial empleada para la generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear, que se

caracteriza por el empleo de materiales fisionables que mediante reacciones nucleares proporcionan calor. Este calor es empleado por un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica.

En todos los reactores nucleares, la energía se libera por fisión de los núcleos de los átomos del combustible en una reacción en cadena. El combustible nuclear más habitual es el uranio 235. Cada átomo de combustible fisionado da lugar a dos nuevos átomos — productos de fisión— y los neutrones expulsados de su núcleo provocan nuevas fisiones de átomos. Los productos de fisión transportan la mayor parte de la energía liberada por ésta, que se transforma a su vez en energía térmica cuando los átomos de combustible adyacentes reducen la gran velocidad de los productos de fisión y absorben su radiación.

Los neutrones transportan alrededor del 3 % de la energía de fisión.

(Enciclopedia de Seguridad en el trabajo, Michael Crane)



**Figura 1.9 Esquema de una central de energía nuclear [7]**

Estas centrales constan de uno o varios reactores, que son contenedores (llamados habitualmente vasijas) en cuyo interior se albergan varillas u otras configuraciones geométricas de minerales con algún elemento fisil (es decir, que puede fisionarse) o fértil (que puede convertirse en fisil por reacciones nucleares), usualmente uranio, y en algunos combustibles también plutonio, generado a partir de la activación del uranio. En el proceso de fisión radiactiva, se establece una reacción que es sostenida y moderada mediante el empleo de elementos auxiliares dependientes del tipo de tecnología empleada.

La energía nuclear se caracteriza por producir, además de una gran cantidad de energía eléctrica, residuos nucleares que hay que albergar en depósitos aislados y controlados durante largo tiempo. A cambio, no produce contaminación atmosférica de gases

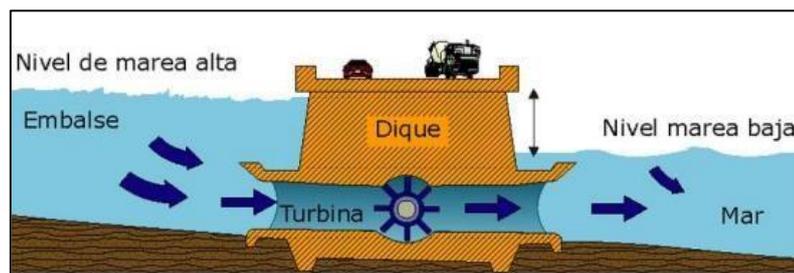
derivados de la combustión que producen el efecto invernadero, ni precisan el empleo de combustibles fósiles para su operación. Sin embargo, las emisiones contaminantes indirectas derivadas de su propia construcción, de la fabricación del combustible y de la gestión posterior de los residuos radiactivos (se denomina gestión a todos los procesos de tratamiento de los residuos, incluido su almacenamiento) no son despreciables.

Ecuador no posee centrales de generación nuclear.

### **Energía Mareomotriz**

La energía del océano se manifiesta al menos de dos maneras: como energía mecánica y energía térmica. La energía mecánica se presenta en forma de marea y olas, la energía de las olas es función directa de la cantidad de agua desplazada del nivel medio del mar que a su vez depende de la velocidad del viento y el tiempo que está en contacto con él.

Las mareas se forman de la atracción gravitacional del Sol y la Luna, y la rotación de la Tierra. La energía de las mareas se deriva de la energía cinética del agua moviéndose de una localización más alta a una más baja. Al agua de las mareas se le suele embalsar y para convertirla en electricidad se la deja salir a través de turbinas que activan a un generador eléctrico.



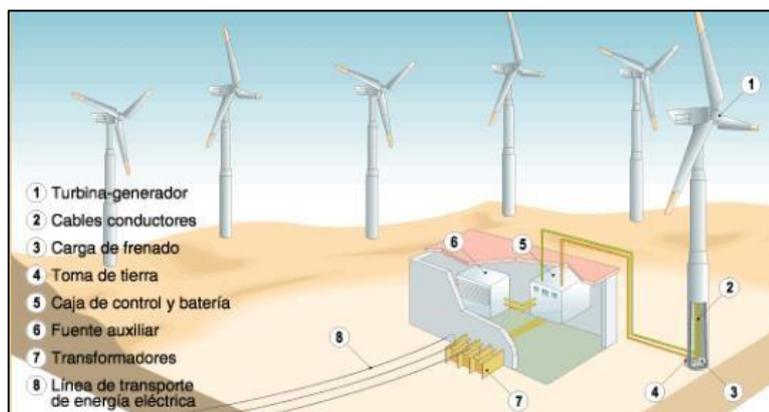
**Figura 1.10 Esquema del aprovechamiento de la energía de la marea [6]**

Se pretende desarrollar la explotación comercial de la conversión en electricidad del potencial energético que tiene el oleaje del mar, en las llamadas centrales mareomotrices. Estas utilizan el flujo y reflujos de las mareas. En general, pueden ser útiles en zonas costeras donde la amplitud de la marea sea amplia, y las condiciones morfológicas de la costa permitan la construcción de una presa que corte la entrada y salida de la marea en una bahía. Se genera energía tanto en el momento del llenado como en el momento del vaciado de la bahía. Ecuador no posee centrales de generación mareomotriz.

## **Energía Eólica**

La energía eólica es la que se obtiene del viento, es decir, de la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire o de las vibraciones que el dicho viento produce. Los molinos de viento se han usado desde hace muchos siglos para moler el grano, bombear agua u otras tareas que requieren una energía. En la actualidad se usan aerogeneradores para generar electricidad, especialmente en áreas expuestas a vientos frecuentes, como zonas costeras, alturas montañosas o islas. La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

El impacto medioambiental de este sistema de obtención de energía es relativamente bajo, pudiéndose nombrar el impacto estético, porque deforman el paisaje, la muerte de aves por choque con las aspas de los molinos o la necesidad de extensiones grandes de territorio que se sustraen de otros usos. Además, este tipo de energía, al igual que la solar o la hidroeléctrica, están fuertemente condicionadas por las condiciones climatológicas, siendo aleatoria la disponibilidad de las mismas.



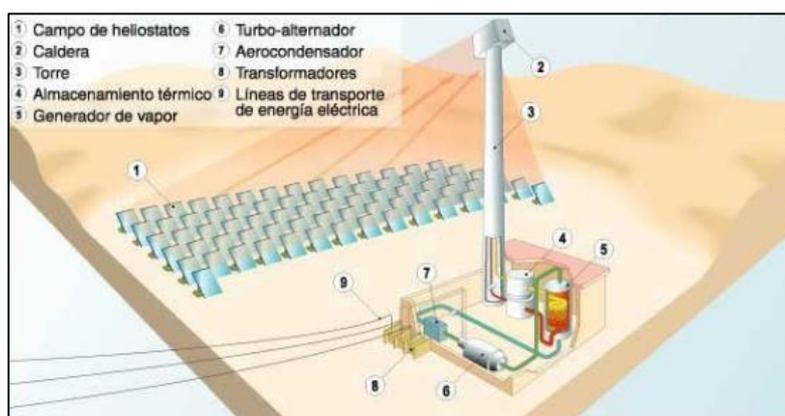
**Figura 1.11 Esquema de una central eólica [5]**

En Ecuador la Unidad de Negocio CELEC EP - GENSUR tiene a su cargo la Central Eólica Villonaco. El Proyecto eólico San Cristóbal se encuentra en operación comercial desde Octubre del 2007 y es manejado en su totalidad por la sociedad anónima Eólica San Cristóbal S.A. – EOLICSA es propietaria en un 100% el Fideicomiso Mercantil Proyecto Eólico San Cristóbal. EOLICSA es una empresa privada, que transferirá sus activos luego de siete años de actividad comercial a la empresa eléctrica provincial Galápagos S.A. ELECGALAPAGOS.

### **Energía Solar**

Una central térmica solar o central termosolar es una instalación industrial en la que, a partir del calentamiento de un fluido mediante

radiación solar y su uso en un ciclo termodinámico convencional, se produce la potencia necesaria para mover un alternador para generación de energía eléctrica como en una central térmica clásica. En ellas es necesario concentrar la radiación solar para que se puedan alcanzar temperaturas elevadas, de 300 °C hasta 1000 °C, y obtener así un rendimiento aceptable en el ciclo termodinámico, que no se podría obtener con temperaturas más bajas. La captación y concentración de los rayos solares se hacen por medio de espejos con orientación automática que apuntan a una torre central donde se calienta el fluido, o con mecanismos más pequeños de geometría parabólica. El conjunto de la superficie reflectante y su dispositivo de orientación se denomina heliostato. Su principal problema medioambiental es la necesidad de grandes extensiones de territorio que dejan de ser útiles para otros usos (agrícolas, forestales, etc.).



### **Figura 1.12 Esquema de una central solar térmica [5]**

En Ecuador las empresas E.E. Galápagos y E.E. Centro Sur tienen a cargo pequeñas centrales de generación fotovoltaicas.

#### **Energía Hidráulica**

La mayoría de la gente asocia el aprovechamiento de la energía hidráulica con una presa o embalse de un río, pero también puede generarse aprovechando las mareas. Una Central Hidroeléctrica es aquella en la cual se aprovecha la energía potencial del agua embalsada en una presa a un nivel más alto que la casa de máquinas para la generación de energía eléctrica.

Una Central Hidroeléctrica consta generalmente de una presa que es donde se almacena el agua, un aliviadero que es por donde se libera el agua sobrante y una casa de máquinas.

El agua se lleva por una tubería de descarga a la sala de máquinas de la Central, donde mediante enormes turbinas hidráulicas se produce la electricidad en alternadores. Las dos características principales de una Central Hidroeléctrica, desde el punto de vista de su capacidad de generación de electricidad son:

- La Potencia: Función del desnivel existente entre el nivel medio del embalse y el nivel medio de las aguas debajo de la Central, y del caudal máximo turbinable, además de las características de la turbina y del generador.
- La Energía: Esta debe estar garantizada en un lapso determinado, generalmente un año, que está en función del volumen útil del embalse, de la pluviometría anual y de la potencia instalada.

La Central Hidroeléctrica también puede contar con diques y otras estructuras de control y contención del agua, que no participan directamente en la generación de electricidad. La casa de máquinas contiene canales de conducción que hacen pasar el agua a través de unas turbinas que convierten el caudal lineal en caudal rotativo. El agua cae por las palas de la turbina o fluye horizontalmente a través de ellas. La turbina y el generador están interconectados. De este modo, la rotación de la turbina hace girar el rotor del generador.

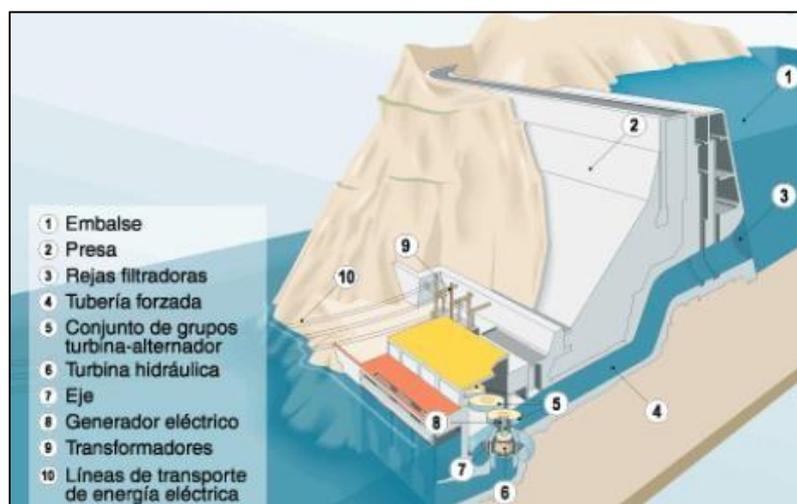
El potencial de energía eléctrica del caudal de agua es el producto de la masa de agua por la altura de caída y la aceleración gravitatoria. La masa depende de la cantidad de agua disponible y de su caudal. El diseño de la Central Hidroeléctrica determina la

altura de caída. En la mayoría de los diseños se introduce el agua desde un punto situado cerca de la parte superior de la presa y se descarga por la parte inferior al cauce fluvial existente aguas abajo. De este modo, se optimiza la altura mientras se mantiene un caudal razonable y controlable.

En la mayoría de las centrales hidroeléctricas modernas, los turbogeneradores están orientados verticalmente (son las conocidas estructuras que sobresalen del piso principal de las centrales). Sin embargo, casi toda la estructura está situada por debajo de lo que puede verse en el piso principal. Se trata del foso del generador y, por debajo de éste, del foso de la turbina y las tuberías de alimentación y descarga. A estas estructuras y a los canales de conducción de agua sólo se entra ocasionalmente.

En las centrales más antiguas, el turbogenerador es de orientación horizontal. El eje de la turbina sobresale de una pared hacia el interior de la casa de máquinas, donde se conecta al generador. Este último se parece a un enorme y anticuado motor eléctrico de carcasa abierta. Como testimonio de la calidad de diseño y construcción de estos equipos, algunas instalaciones de fin de siglo todavía continúan en funcionamiento.

En ciertas centrales modernas se han incorporado versiones actualizadas de los diseños antiguos. En ellas, el canal de agua rodea completamente el turbogenerador y el acceso tiene lugar a través de una camisa tubular que atraviesa el canal.



**Figura 1.13 Esquema de una Central Hidroeléctrica [5]**

En los devanados del rotor del generador se genera un campo magnético. La energía de este campo procede de baterías ácidas de plomo o alcalinas de níquel cadmio. El movimiento del rotor y el campo magnético presente en sus devanados inducen un campo electromagnético en los devanados del estator. El campo electromagnético inducido crea la energía eléctrica que se suministra a la red. La tensión eléctrica es la presión eléctrica originada por el caudal de agua. Para mantener la presión eléctrica —es decir, la tensión— a un nivel constante, hay que modificar el

caudal de agua que pasa por la turbina en función de la demanda o de cambio de condiciones.

El flujo de electricidad puede producir un chisporroteo, por ejemplo en el conjunto excitador del rotor, que puede generar ozono, el cual, incluso a niveles bajos, resulta perjudicial para la goma de las mangueras contra incendios y otros materiales.

Los generadores de energía hidroeléctrica producen altas tensiones e intensidades muy altas. Los conductores de los generadores se conectan al transformador de la unidad y desde éste a un transformador de potencia. El transformador de potencia incrementa la tensión y reduce la intensidad para su transmisión a larga distancia. Una baja intensidad minimiza la pérdida de energía por calentamiento durante la transmisión. En algunos sistemas se emplea como aislante el gas hexafluoruro de azufre en lugar de los aceites convencionales. El chisporroteo eléctrico puede descomponer este aislante en productos notablemente más peligrosos que el compuesto original.

Los circuitos eléctricos contienen disyuntores que pueden desconectar el generador de la red eléctrica de forma rápida e impredecible. En algunas unidades se emplea un chorro de aire

comprimido para romper la conexión. Cuando actúa una unidad de este tipo, se produce un altísimo ruido de impacto.

Esta forma de energía posee problemas medio ambientales al necesitar la construcción de grandes embalses en los que acumular el agua, que es sustraída de otros usos.

## **CAPÍTULO 2 2. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL ECUADOR**

En el presente capítulo se describirá la Central Hidroeléctrica a estudiar en el proyecto, su ubicación, el caudal, el tipo de turbina que posee, sus características, sus partes, además de los tipos de mantenimientos que se realizan en la misma para mantener a la Central funcionando de manera óptima.

Se mostrará una breve descripción de las Centrales Hidroeléctricas de Ecuador que están a cargo de las Unidades de Negocio de CELEC E.P. mencionadas en el capítulo anterior.

**TABLA 4**

## CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL ECUADOR [2]

Central	Potencia Nominal (MW)
Mazar	183,66
Paute	1075
Ocaña	26,1
Saucay	24
Saymirín	14,43
El Carmen	8,4
Noroccidente	0,26
Recuperadora	14,7
Marcel Laniado	213
Corazón	1
Sibimbe	16
Uravia	1
Agoyán	156
Pucará	73
San Francisco	230

### 2.1. Descripción de la Central Hidroeléctrica

La Central se encuentra en la provincia de Tungurahua a 180 Km. al Sureste de Quito y a 5 Km. al este de la ciudad de Baños, fue creada para la producción eficiente de energía eléctrica, en beneficio de todo el país.

Fue concebida para aprovechar el caudal del Río Pastaza, la cuenca del río tiene una extensión de 8270 Km<sup>2</sup>, en las provincias de Cotopaxi, Chimborazo y Tungurahua.

La extensión global de la zona de influencia de la Central es de 5.000 Km<sup>2</sup> y tiene una producción media anual de 1.080 GWH.

El nivel máximo del embalse se encuentra a una altitud de 1651 m.s.n.m.

La Central aporta con 156 MW al sistema nacional, consta de dos turbinas de eje vertical y cada unidad genera 78 MW.

#### □ **Principales Características de la Central**

Capacidad: 156 MW

Muro Ataguía: Desarenador y embalse de regulación diaria para 60 m<sup>3</sup>/s, 600.000 m<sup>3</sup>

Túnel de Presión: Longitud 2.400 m para 120 m<sup>3</sup>/s, Ø= 6 m

Chimenea de Equilibrio: Subterránea

Tubería de Presión: 170 m con una caída de 150 m

Equipos: Hidromecánicos, mecánicos, eléctricos y de control

Casa de Máquinas: Subterránea para alojar 2 grupos turbogeneradores de 85.000 KVA cada uno

Subestación: Aislamiento en gas de 138 KV

Descarga: Dos túneles de descarga de baja presión de 116 m c/u, diámetro = 6,00 m

#### □ **Información Técnica de la Central**

Al río Pastaza es la unión del río Chambo y Patate.

En el Anexo C se muestra la media de caudales representativos registrados al ingreso del embalse en el periodo 1997 - 2007.

#### □ **Presa**

Los desagües de fondo se encuentran en el centro de la presa, la solera de ingreso se encuentra en la cota 1626 m.s.n.m. Se compone por dos compuertas: plana y radial; la compuerta plana sirve para realizar reparaciones en la compuerta radial que es la que se usa para la evacuación de agua y sólidos. La capacidad máxima de desfogue con la compuerta radial completamente abierta es de 1000 m<sup>3</sup>/s.

### **TABLA 5**

**DATOS TÉCNICOS DE LA PRESA**

<b>Tipo</b>	<b>Hormigón a gravedad, controlada x compuertas.</b>
Volumen de Hormigón	17.800 m <sup>3</sup>
Altura	43m.
Elevación de Corona	1653 m.s.n.m.
Longitud de Corona	300 m.
Vertedero (Tipo)	Compuerta
Capacidad en Vertederos	3800 m <sup>3</sup> /s
Capacidad en Desagües de Fondo	2000 m <sup>3</sup> /s

**TABLA 6****CARACTERÍSTICAS DEL CANAL DE DESVÍO Y LIMPIEZA DE LA PRESA**

Longitud	239 m
Sección trapezoidal b	22.00 m
Gradiente	1.66%

**TABLA 7****CARACTERÍSTICAS DE LA ATAGUÍA PERMANENTE**

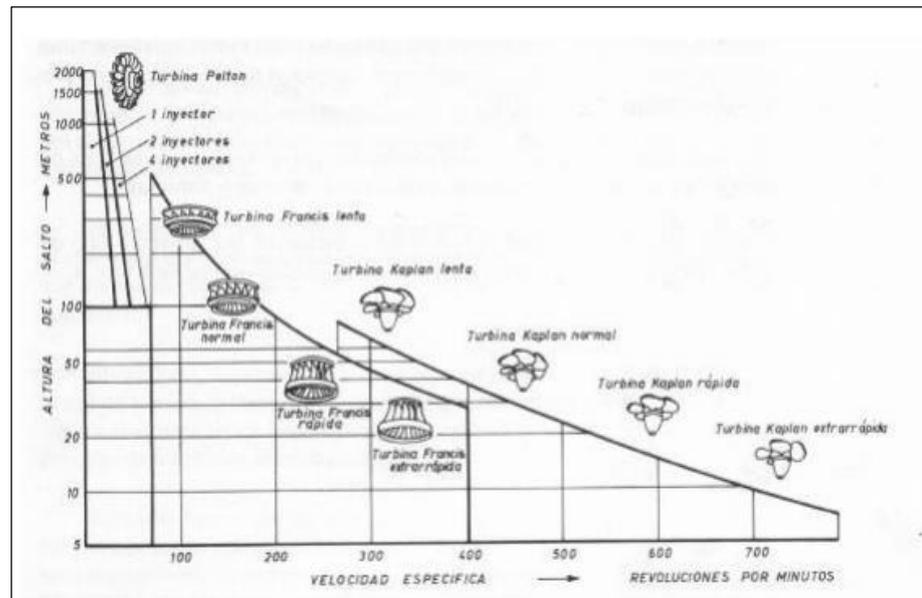
<b>Tipo</b>	<b>Hormigón en Arco</b>
Volumen de Hormigón	11.500 m <sup>3</sup>
Altura máxima	35 m.

Elevación de Corona	1645 m.s.n.m.
Longitud de Corona	160 m.
Capacidad de los vertederos	120 m <sup>3</sup> /s

## **2.2. Turbina Francis y sus características técnicas**

Es una turbina de reacción de las más utilizadas en la que su altura de trabajo está entre el nivel del agua en la cámara de carga y el canal de descarga. Se adapta muy bien a todo tipo de saltos y caudales, y cuenta con un rango de utilización muy grande. Se caracteriza por recibir el fluido de agua en dirección radial, y a medida que está recorren la máquina hacia la salida se convierte en dirección axial.

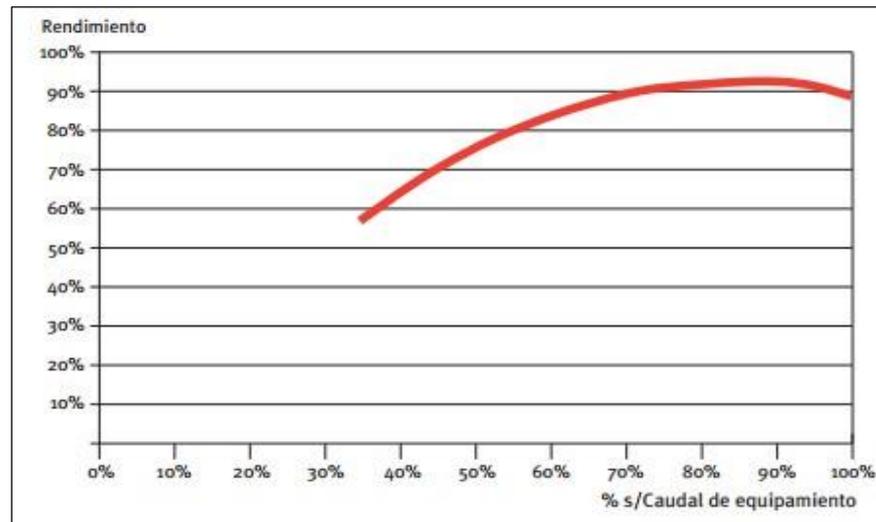
Es fácilmente regulable y trabaja a un número elevado de revoluciones, pueden ser: lentas, normales, rápidas y extra rápidas.



**Figura 2.1 Selección de Turbina Hidráulica [8]**

Como se puede observar en la Figura 2.1 la turbina tipo Francis se encuentra en un rango medio de altura de salto entre: 18 – 520 metros de altura. Con caudales medios de 1 - 700 m<sup>3</sup>/s. Potencia: 0,1 – 80 MW.

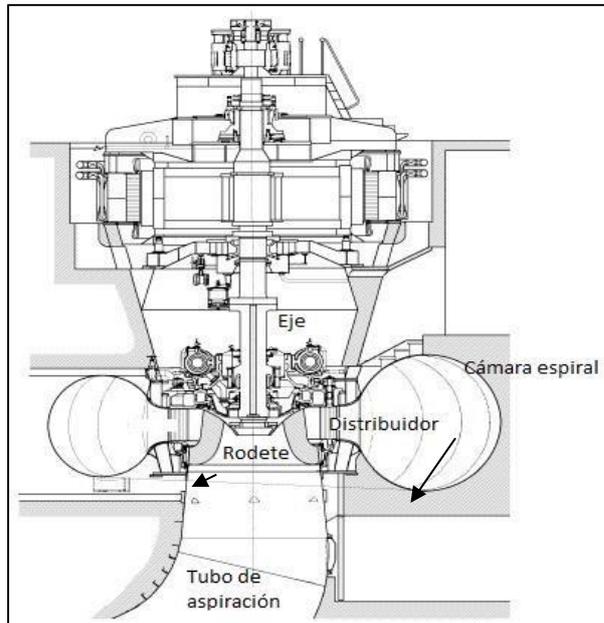
El rendimiento de las turbinas Francis es mayor al 90% en condiciones óptimas de funcionamiento. Permite variaciones de caudales entre el 40% y el 105% de caudal de diseño, y en el salto entre 60% y el 125% del nominal.



**Figura 2.2 Rendimiento turbina Francis [9]**

### **Componentes principales de la turbina**

1. Tubería forzada
2. Cámara espiral
3. Distribuidor
4. Eje
5. Rodete
6. Tubo de aspiración

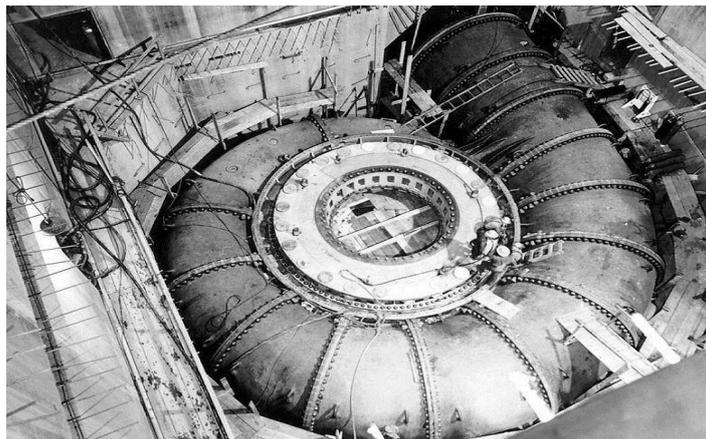


**Figura 2.3 Elementos de una turbina [10]**

1. *Tubería forzada*: es el conducto por donde ingresa el agua a la máquina a alta presión.
2. *Cámara espiral o caracol*: conducto en forma de espiral al que llega el agua de la tubería forzada donde el diámetro interior de la virola correspondiente alcanza su valor máximo, la parte interna circular decrece de a poco hasta la virola que realiza el cierre de la cámara sobre sí misma, cuyo diámetro interior se reduce considerablemente. Parte de la energía de presión del agua que entra se convierte en energía cinética, dirigiendo el agua alrededor del distribuidor. La forma de caracol hace que el agua circule

con una velocidad aparentemente constante y no permite que se forme torbellinos, evitando así pérdidas de carga.

La zona periférica interna es totalmente concéntrica con el eje de la turbina, formando un anillo, sus extremos están enlazados perpendicularmente por una sucesión de alabes fijos que están equidistantes unas de otras a lo largo de la circunferencia descrita por el anillo por donde pasará el agua [11].



**Figura 2.4 Cámara espiral de una turbina Francis [12]**

3. *Distribuidor*: contiene una serie de álabes directrices dispuestas de forma circular los cuales le dan la orientación del agua hacia el rodete. Regula o corta totalmente el caudal de agua que fluye hacia el rodete.

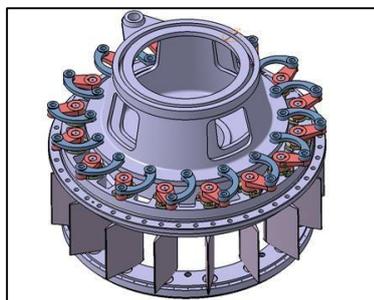
Se compone principalmente de:

- Álabes directrices
- Sistema de accionamiento de los álabes

*Los alabes directrices* cuando se encuentran en posición de cerrado no ingresa agua al rodete, se van abriendo conforme giran cierto ángulo sobre su propio eje hasta llegar a una posición de apertura máxima donde el caudal de agua que ingresa es el máximo. Todos los alabes directrices se accionan por medio de un anillo móvil al que todos están unidos.

*El sistema de accionamiento*, son elementos mecánicos a base de servomecanismos, palancas y bielas que conforman el equipo que se encarga de regular a la turbina y está dirigido por el regulador de velocidad.

La turbina de la hidroeléctrica consta de 20 alabes directrices para cada unidad de generación.



**Figura 2.5 Distribuidor y alabes móviles de la turbina Francis [13]**

4. *Eje:* Aquí están conectados diferentes elementos con los cuales se logra un funcionamiento óptimo de la turbina siendo su pieza clave el rodete.

En determinados grupos, por características constructivas de los mismos referidos a condiciones de peso y sustentación o aireación del rodete, el eje es hueco y el diámetro es 810 mm.

5. *Rodete:* Es la pieza fundamental de la turbina, de donde se obtiene la energía mecánica deseada. Es un elemento móvil formado por una corona con alabes fijos de superficie alabeada, forma una pieza única en bloque por fundición o soldadura, que transforma la energía cinética y de presión del agua de trabajo. Cambian la dirección del agua de radial a axial. Se encuentra unida a la parte inferior del eje de la turbina, en situación concéntrica con el distribuidor.



### Figura 2.6 Rodete de Turbina Francis

6. *Tubo de aspiración:* Conduce el flujo de agua de una manera recta al canal de desagüe. Sale el agua a baja presión y así mantiene la diferencia de presión para el correcto funcionamiento de la turbina. La presión a la salida puede llegar a descender de manera peligrosa, favoreciendo así al fenómeno de la cavitación. Recupera al máximo posible la energía cinética residual a la salida del rodete. La energía cinética residual en turbinas lentas es despreciable, pero en Turbinas Francis rápidas representan aproximadamente el 30% del salto neto.

### Características técnicas de la turbina de la central

**TABLA 8**

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA TURBINA INSTALADA EN LA CENTRAL**

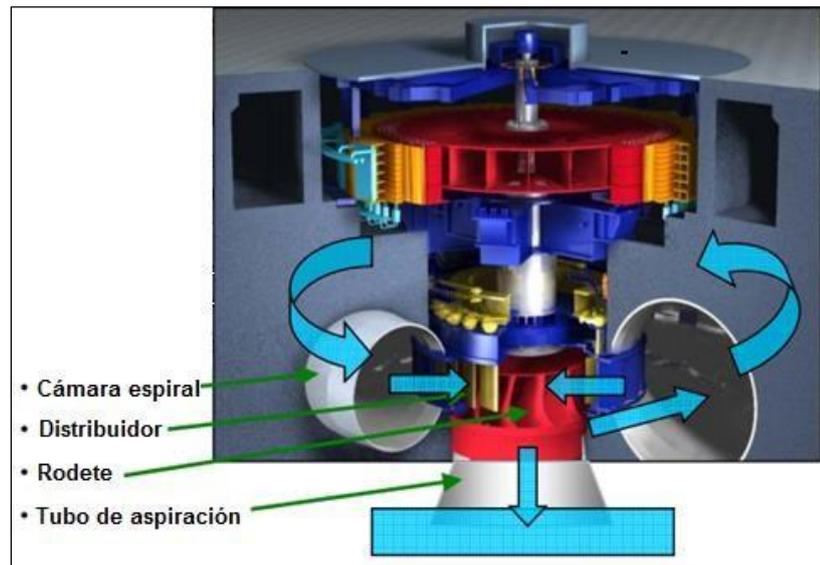
Tipo de Turbina	Francis
Cantidad de Turbinas	2
Diámetro del rotor de la Turbina	3500 mm
Potencia nominal	78 MW
Diámetro del rodete en la salida	2800 mm
Número de álabes del rodete	17
Número de álabes directrices	20

Rotación de disparo	348.75 rpm
Rotación de la Turbina	225 rpm
Caída neta nominal	149 m
Eficiencia máxima	96 %
Sentido del Giro	Horario (Visto de arriba)
Tipo de accionamiento	Accionamiento por los servomotores y cierre por contrapeso
Eje	Vertical
Número de cojinetes de la turbina	10
Tipo de cojinete	SEGMENTOS TIPO PATÍN
Diámetro de la Válvula Mariposa	2.7 m
Densidad del agua	0,99985 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura del agua	16°C

### **Funcionamiento de la Turbina Francis**

La transformación de la energía se produce de la siguiente manera:

La energía potencial del agua que se encuentra embalsada se convierte en energía de presión y otra parte en energía cinética al llegar a la turbina, sin considerar las pérdidas.



**Figura 2.7 Funcionamiento de Turbina Francis [14]**

Como se puede observar en la Figura 2.7, el fluido ingresa por la cámara espiral convirtiendo la energía potencial del agua que se encuentra embalsada en energía cinética, así como distribuye de manera uniforme el agua alrededor del rodete.

El agua que sale de la cámara espiral pasa primero por el distribuidor que tiene los álabes móviles que regulan el caudal que entra al rodete. Estos álabes móviles son orientables, de modo que se pueden abrir hasta que el flujo de agua genera una eficiencia máxima o se pueden cerrar totalmente para evitar el paso del agua hacia el rodete; así controlan la velocidad a la que gira el rodete.

En su recorrido por el rodete entre los alabes fijos, el agua ingresa de manera radial haciéndolo girar gracias a las condiciones de caudal y presión del fluido. Al salir del rodete experimenta una caída de presión y de velocidad hasta que desciende por el centro del rodete hacia el tubo de aspiración a baja presión; al girar el rodete comunica su movimiento al eje de la turbina, que está conectado al generador.

Debido a problemas que plantean altas presiones y velocidades, existe un límite para la altura de salto de agua con la que se puede usar este tipo de turbinas.

### **2.3. Mantenimiento de la turbina Francis**

El mantenimiento es la actividad ordenada, planificada y permanente a fin de mantener en perfecto funcionamiento las maquinarias o equipos.

El mantenimiento en una central se divide en dos partes: mantenimiento eléctrico y mantenimiento mecánico. Ambos se pueden realizar al mismo tiempo y las tareas son completamente diferentes.

Para realizar el mantenimiento puede ser necesario que se pare la unidad generadora por un lapso de tiempo en el cual se corta el flujo de agua mediante compuertas que son las que bloquean el canal de alimentación. El nivel de agua en reposo a la salida de la turbina debe estar por debajo del nivel de la cámara espiral y de los álabes del rodete, así se logra el acceso a la turbina.

Cuando es necesario se realiza el desmontaje de la turbina y el generador, se colocan los componentes en el piso principal del cuarto de máquinas con la ayuda de un puente grúa.

Por lo general los álabes del rodete, los álabes móviles y las estructuras que conducen el agua, sufren daños debido a la cavitación y a los materiales sólidos que se encuentran en el río, que al entrar en la turbina a gran velocidad produce deformaciones.

Para reparar los daños que la cavitación y materiales sólidos provocan, se realizan mantenimientos predictivos y correctivos.

### **Mantenimiento Predictivo**

Se realizan acciones de inspección, revisión y limpieza para evitar que existan fallas en los equipos.

Lo que se quiere lograr al realizar el mantenimiento predictivo es:

- Contribuir a mantener la producción de energía al máximo de diseño de la central.
- Minimizar las paras de la central por fallas en las máquinas o equipos.
- Evitar que existan daños a las personas, instalaciones y equipos de la central.
- Reducción en los costos y tiempo de mantenimiento correctivo, mediante la optimización de recursos.
- Mantener la capacidad de producción de energía de la Central
- Tomar las medidas necesarias para que no existan fallas en el funcionamiento de los equipos.

En las centrales hidráulicas pequeñas es importante priorizar el mantenimiento preventivo para que las fallas sean mínimas y evitar que así se produzcan pérdidas económicas [10].

### **Mantenimiento correctivo**

Son las acciones y medidas que se toman para reparar fallas de los equipos una vez producidos.

Para diferentes equipos el mantenimiento se lo puede programar conjunto con el mantenimiento preventivo.

Los programas de mantenimiento se deciden de acuerdo a la función que tenga el equipo, la naturaleza del componente y la frecuencia de su mantenimiento.

**TABLA 9 PLAN DE MANTENIMIENTO PARA EL GENERADOR**

<b>GENERADOR</b>		
<b>Operación</b>	<b>Anual</b>	<b>Otros</b>
Inspección y limpieza de la bobina interior	x	
Lubricación de cojinetes		Cada 3 meses
Medición del aislamiento	x	
Reparación y/o cambio de cojinetes		Según desgaste

**TABLA 10 PLAN DE MANTENIMIENTO PARA LA TURBINA**

<b>TURBINA</b>		
<b>Operación</b>	<b>Mensual</b>	<b>Anual</b>
Revisar la cámara de la turbina, las válvulas de admisión y las tuberías en busca de deterioro o fugas.	X	X
Inspeccionar los sellos en busca de fugas en los cojinetes de los álabes de las guías, eje y cojinetes del generador.	X	X
Revisar los álabes guías, álabes directrices e interior de la cámara espiral.		X

Revisar el rodete y cámara espiral.		X
Revisar el aparato de los álabes guías en busca de holguras, cojinetes gastados y de la geometría apropiada.		X

El presente estudio se enfocará en la reparación completa del rodete Francis, que es la pieza fundamental de la turbina. Posteriormente, se explicará de manera más detallada los problemas que suelen presentar los rodetes y la reparación con la que se procede para que puedan ser reutilizados y darles una mayor vida útil.

## **CAPÍTULO 3 3. RODETES DE UNA TURBINA FRANCIS**

Como se indicó en el capítulo anterior, el rodete es una de las partes fundamentales de la turbina, en este caso la tipo Francis. Por ser un componente de tanta importancia, debe encontrarse en óptimas condiciones de operación; de esta manera se asegura un rendimiento eficiente de la turbina, lo que implica obtener una máxima generación de energía.

Para un correcto desempeño de la turbina, se deben llevar a cabo mantenimientos periódicos con el fin de evitar futuros inconvenientes que afecten la producción de energía de la central.

Existen dos tipos de mantenimientos que se realizan a la central, mantenimiento menor y mantenimiento mayor (Overhaul). La diferencia entre ambos es la exhaustividad con la que se realiza cada uno.

Cuando se procede a realizar un mantenimiento menor en la central, se paran las operaciones por horas; o si ha existido algún daño relevante, unos cuantos días sin realizar desmontaje de la turbina. Se evalúan todas

las piezas y se realizan reparaciones puntuales de las partes afectadas o cambio de piezas pequeñas en mal estado.

En un mantenimiento mayor de la central, las operaciones se paran por 30 días aproximadamente; en este caso, se realiza el desmontaje de la turbina y de manera detallada se revisa cada pieza para reparar y hacer el cambio de las más grandes.

Los mantenimientos de la central deben planificarse con anticipación y en coordinación con el resto de centrales eléctricas del país, debido el impacto que tendrá el cese de operaciones en la producción total de energía. Al dejar de operar la central existirá un déficit de energía, el cual deben de tratar de suplir las demás centrales.

Como se mencionó, en el mantenimiento mayor es donde se lleva a cabo el desmontaje de la turbina y se inspecciona detenidamente cada una de las partes para valorar el estado en el que se encuentra. En el caso específico del rodete se extrae el que estaba en funcionamiento y se coloca uno nuevo o uno reparado.

Los rodetes tienen cierto periodo de vida útil; sin embargo, luego de este tiempo se puede realizar una reparación completa de los mismos donde se corrijan los daños causados principalmente por el constante contacto con materiales sólidos que ingresan junto con el agua de río a la turbina.

El período promedio que los rodetes operan en la central es de seis años. Para sustituir un rodete viejo con uno nuevo, se tomará en cuenta los mantenimientos que se le haya realizado y el nivel de desgaste que posea.

### **3.1. Inspección del rodete**

Antes de llevar a cabo un mantenimiento al rodete, se realiza una inspección para identificar cómo se encuentra el rodete y verificar los daños que ha sufrido; en este caso, el presente estudio se basa en una reparación total del mismo.

Para determinar la factibilidad de realizar una reparación total del rodete se procede a realizar una serie de pruebas, esta inspección del rodete permite diagnosticar el estado en el que se encuentra.

Cuando las centrales hidroeléctricas compran un rodete, la empresa fabricante entrega toda la información técnica de cada pieza, la cual está descrita en planos; en ellos se detallan principalmente dimensiones, eficiencia, material y fecha de fabricación.

Además de esta información, los planos traen consigo plantillas. Cada plantilla tiene una ubicación exacta en el rodete; que a manera de molde sirve de referencia y permite verificar el desgaste que existe mediante un control dimensional. Una vez que la plantilla se coloca en el sitio que le corresponde, se determina la cantidad de material que se ha perdido.

Luego de verificar que el desgaste no es significativo y que no existe mucho material desprendido de la superficie del rodete, se realizan ensayos no destructivos con tintas penetrantes y partículas magnéticas para detectar si existen fisuras o algún otro daño; y la ubicación de las mismas. Siguiendo la norma CCH 70-3 y con la ayuda de los planos, finalmente se determina si estas fisuras son aceptables.

Si el desgaste que se verificó en la inspección del rodete no es aceptable según las normas bajo las que se realizó los ensayos no destructivos, se procede a desechar el rodete como chatarra.

Por otra parte, si la inspección del rodete es favorable, significa que se lo puedo reparar, es decir, se puede reponer el material que se ha desgastado. De esta forma, cuando se haga un mantenimiento mayor de la central, el rodete podrá ser reutilizado.

### **Problemas en el rodete**

Los problemas que se presentan en el rodete, provocan el desgaste de la superficie del mismo, lo cual produce que existan pérdidas en la generación de energía. Estos desgastes principalmente dependen de los siguientes factores:

- Erosión
- Cavitación
- Material de fabricación de piezas
- Corrosión

### **Calificación de los daños**

Para poder realizar una buena calificación de los daños se usan los ensayos no destructivos END, que me van a ayudar a detectar y evaluar discontinuidades (superficiales e internas) en materiales, soldaduras, componentes y partes fabricadas, sin modificar sus condiciones de uso o servicio [19].

Los END no causan un daño considerable a la pieza evaluada, se realizan bajo normas o códigos de fabricación, tales como ASME, ASTM, API, AWS, entre otros.

Se puede realizar una clasificación solo tomando en cuenta la aplicación, los cuales se clasifican en:

- Técnicas de Inspección Superficial
- Técnicas de Inspección Volumétrica
- Técnicas de Inspección de la Integridad o Hermeticidad

Para la reparación de rodetes se usan las técnicas de Inspección Superficial y técnicas de Inspección Volumétrica.

#### Técnicas de Inspección Superficial

Las técnicas de Inspección Superficial se limitan a la detección de discontinuidades que están en la superficie, abiertas a la superficie a profundidades menores a 3 mm (0.11 pulg). Para esta técnica se pueden usar los siguientes END:

- Inspección Visual (VT)
- Tintas Penetrantes (PT)
- Electromagnetismo (ET)
- Partículas Magnéticas (MT)
- Corrientes Inducidas
- Termografía

#### **Técnicas de Inspección Volumétrica**

Las técnicas de inspección Volumétrica es posible detectar discontinuidades internas que no son visibles en la superficie de la pieza. Para esta técnica se pueden usar los siguientes END:

- Ultrasonido Industrial (UT)
- Radiografía Industrial (RT)
- Radiografía Neutrónica (NT)
- Emisión Acústica (AET)

Estos tipos son los que se van a necesitar para hacer una buena inspección del rodete, poder evaluar los daños y dar la aceptación para que se ejecute la reparación completa del rodete.

### **Técnicas de inspección de la integridad o hermeticidad**

Estas técnicas comprueban la capacidad de un componente o de un recipiente para contener un fluido (líquido o gaseoso) a una presión superior, igual o inferior a la atmosférica, sin que se presenten pérdidas apreciables de presión o de volumen del fluido de prueba en un periodo previamente establecido. Este tipo de inspección se realiza empleando cualquiera de los siguientes ensayos:

- Pruebas de cambio de Presión: Hidrostática y Neumática.
- Pruebas por pérdida de fluido: Cámara de burbujas, Detector de Halógeno, Espectrómetro de Masas, Detector Ultrasonico, Cámara de Vacío.

### **3.2. Opciones para la reparación del rodete Francis**

Luego de haber realizado todas las pruebas necesarias y determinar que la reparación del rodete es factible, el paso siguiente es decidir cómo se procederá a repararlo.

Para tomar una decisión se deben considerar múltiples factores tales como el tiempo que demandará la reparación del rodete y los costos en los que se incurrirá.

Existen dos alternativas para realizar la operación, una es enviar el rodete al exterior donde existe la tecnología suficiente y la gente capacitada para hacer el trabajo; y la otra es construir un taller en la central que posea todos los equipos e implementos necesarios para realizar las reparaciones de los rodetes y demás piezas de las turbinas, además de capacitar a personal que sea capaz de realizar estos trabajos aquí en el país.

A continuación se analizarán las opciones y se comparará las ventajas y desventajas de cada una.

#### **Reparación del rodete en el exterior**

La reparación de los rodetes de la central se ha realizado en el exterior puesto que en el país no existe la tecnología, ni la mano de obra calificada para llevarla a cabo.

La reparación de rodetes en el exterior ya se ha realizado, además de enviar los rodetes, técnicos de la central fueron enviados para que sean parte del proceso y adquieran conocimientos técnicos de cómo se realiza la reconstrucción del rodete. Sin embargo, los técnicos participaron sólo en ciertas partes de proceso, debido a que el tiempo que demanda la reparación total es considerable.

Para poder realizar la reparación del rodete se genera una orden de trabajo, se buscan todos los posibles proveedores del servicio y se elaboran las cotizaciones respectivas para poder hacer un análisis comparativo. La valoración del rodete que realizan los técnicos de estas empresas necesita de una inspección visual que determine si la reparación es posible, además les da una noción más exacta de los costos en los que se incurrirá en la reparación.

Una vez que se escoge al mejor candidato, se realizan todos los arreglos pertinentes para la movilización del rodete desde la central hasta el taller especializado donde se llevará a cabo la reparación total del rodete.

### **Reparación del rodete en el país**

La segunda alternativa para la reparación del rodete Francis es realizar la construcción y equipamiento de un taller mecánico

industrial para la reparación de las grandes piezas mecánicas de centrales de generación hidráulica del país.

Si se escoge esta opción, se debe realizar el diseño del taller industrial, adquirir los equipos necesarios tales como el torno vertical, pulidoras, soldadoras, un centro de mecanizado y horno de tratamiento térmico, además instalar y hacer las pruebas de los transformadores que darán energía al taller.

Adicional a la infraestructura se debe instruir al personal para que con criterios técnicos realicen la reparación. Para esto, será necesario que una empresa consultora experta en el tema, brinde todos los conocimientos que se requieren para elaborar un manual de procedimientos y así lograr tener una mano de obra calificada para el trabajo. Así se tendría una guía de los pasos a seguir para que todos los técnicos de la Central tengan una clara idea de cómo se debe llevar a cabo la reparación.

### **Selección del método de reparación**

Pocos años atrás, nadie en Ecuador poseía los conocimientos técnicos específicos para llevar a cabo la reparación total de un rodete y no se contaba con un taller donde efectuar el trabajo.

La reparación de los rodetes se ha realizado fuera del país, sin embargo, se notó que la eficiencia en la generación de energía no era la esperada al momento de estar operando. El objetivo de reparar el rodete es lograr que vuelva a tener la misma eficiencia que cuando se puso en funcionamiento por primera vez y se evite pérdidas cuantiosas en la generación de energía de la central.

Se decidió contratar a un técnico especialista dedicado a prestar el servicio de reparación de rodetes, y se verificó que la reparación realizada en el exterior no fue hecha correctamente; la superficie de los álabes del rodete no era plana y lisa.

La irregularidad en la superficie del rodete causa un efecto negativo en el desempeño del mismo, dado que cuando pase el fluido por los álabes en dichas zonas se volverá turbulento, y por ende, la eficiencia disminuirá.

Si se consideran los costos de fabricación e importación, y el tiempo que demora la compra de un rodete nuevo, se puede verificar que

representan altos valores monetarios y un costo de oportunidad significativo para la central.

El ahorro que se genera en reparar un rodete y comprar uno nuevo puede ser desde 50% hasta 80%, un rodete nuevo cuesta cerca 3,5 millones, mientras que una reparación va desde 300 mil a 600 mil dólares.

La construcción de un rodete nuevo es de 3 años mínimo, pero todo el proceso completo hasta que el rodete llegue a la central es de alrededor de 4 años, esto se debe a contratos, presupuestos con los que se debe cumplir. Mientras que la reparación de un rodete, puede durar desde 3 a 7 meses, dependiendo el estado de deterioro y tamaño del mismo.

Se decide que la mejor decisión es reparar el rodete en el país, ya que ahora existe una base de conocimientos técnicos sobre el comportamiento de turbinas, fenómenos de desgaste y la experiencia observando las reparaciones que se les han hecho a los rodetes ya reparados en el exterior. Adicionalmente, los equipos que se necesitan para montar el taller técnico especializado realizar trabajos de reparación de rodetes y demás piezas de turbinas hidráulica se los puede conseguir en el mercado.

El taller industrial no solo serviría para la reparación de los rodetes Francis sino también para los rodetes Pelton así como las diferentes partes de las turbinas de la Central Hidráulica y del resto de centrales del país, públicas y privadas. En la Tabla 3.4 se realiza una comparación de los factores que influyen en la toma de decisión de la reparación del rodete. A continuación la comparación se la realiza con un rodete Francis de 3.5 m  $\varnothing$  y 17 T de peso desgaste del 50%.

**TABLA 11 CUADRO COMPARATIVO DE OPCIONES DE REPARACIÓN PARA UN RODETE FRANCIS**

	Reparación del rodete en el exterior	Reparación del rodete en el país	Compra de un rodete nuevo
Costo	\$ 600.000,00	\$ 400.000,00	\$ 3.500.000,00
Tiempo	10 meses	8 meses	4 años
Experiencia	Media	Baja	Alta

Eligiendo la opción de la reparación aquí, se necesita de un procedimiento a seguir para poderla ejecutar paso a paso y así poder ahorrar el tiempo y el dinero de una reparación en el exterior. Para poder ejecutar la reparación completa de los rodetes se consultó a un técnico experto en la reparación de turbinas hidráulicas sobre todo lo necesario. En el Anexo D se describe un

proceso general de los pasos a seguir para la reparación completa del rodete Francis.

# CAPÍTULO 4

## 4. IMPLEMENTACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN Y REPARACIÓN

En el presente capítulo se describirán las máquinas y herramientas que se utilizarán para el equipamiento del taller industrial donde se realizarán las reparaciones del rodete. Además, se describirán los procedimientos a seguir para llevar a cabo la recuperación total de un rodete Francis. El alcance del taller que se propone es para un diámetro de 4000 mm y 20 toneladas. Tomando en cuenta que la reparación que se plantea se puede extender a no solo la de los rodetes de la central ( 3500 mm de diámetro, peso 17.2 toneladas), sino también el de otras centrales hidroeléctricas que se encuentran en el país y que se ajusten a las condiciones del tamaño del taller.

### 4.1. Diseño de un taller industrial para reparación de rodete

Para poder realizar la reparación de los rodetes, es necesario disponer de ciertos equipos y herramientas. Dada la información de técnicos especializados y un proceso de investigación se puede

detallar las características específicas necesarias de los mismos, y así poder ejecutar paso a paso el procedimiento planteado.

### **Equipos, herramientas y sus características**

A continuación se detallan los equipos requeridos para la recuperación de los rodets Francis y sus principales características:

#### **SOLDADORA**

Tipo TIG y Electrodo

Para soldadura profesional

Sofisticado control de la situación de cortocircuito y, por lo tanto, de la transferencia de la gota de soldadura.

Para soldar electrodo revestido (SMAW) de corriente alterna y directa (C.A. y C.D.).

Diámetros: 3/32" (2.3 mm) a 3/16" (4.8mm).

Soldadura TIG (GTAW) con C.D. en aceros inoxidable, aleados, aleaciones de níquel y cobre etc., con arranque por contacto.

**TABLA 12 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PARA SOLDADURA TIG Y GTAW**

Soldadura TIG	Soldadura SMAW
---------------	----------------

Electrodo	Aporte	Electrodo
De tungsteno 2,4x175mm ANSI/AWS 5.1298	Acero inoxidable ER410NiMo 3/32" x 36"	SVL 13/4-15 AWS A5 4/A5 4M-2006 E410 NiMo-15
	Acero inoxidable 410NiMo diámetro 1,2 mm	

### AMOLADORAS INDUSTRIALES DE ALTA FRECUENCIA

**TABLA 13 DESCRIPCIÓN DE LAS AMOLADORAS INDUSTRIALES DE ALTA FRECUENCIA**

Tipo	Descripción
Amoladora angular d=125mm	Amoladora angular de alta frecuencia con cuello largo para puntos de difícil acceso.
Amoladora angular d= 230mm	Potente amoladora angular de alta frecuencia para trabajos de tronzado y rectificado medios hasta pesados.
Rectificadora recta 18000/min	Rectificadora recta de alta frecuencia manejable para trabajos de rectificado ligeros.
Rectificadora recta 18000/min	Rectificadora recta de alta frecuencia ligera y manejable para trabajos de fresado.

**TABLA 14 CARACTERÍSTICAS DE AMOLADORAS Y RECTIFICADORAS**

Accesorios para rectificadoras	Diámetro
Pinzas portapiezas	6 mm
	8 mm
Mandril de sujeción	8 mm



**Figura 4.1 Amoladora angular de alta frecuencia**



**Figura 4.2 Rectificadora recta de alta frecuencia**

Las herramientas que se utilizan con estos equipos son los siguientes:

- Lija rotativa circular grano 80, diámetro 50 mm, vástago de 1/4". Cantidad aprox. 60
- Lija rotativa circular grano 60, diámetro 50 mm, vástago de 1/4". Cantidad aprox. 20
- Lija rotativa circular grano 60, diámetro 40 mm, vástago de 1/4". Cantidad aprox. 20
- Lija rotativa circular grano 60, diámetro 30 mm, vástago de 1/4". Cantidad aprox. 10
- Lija rotativa plana grano 40, 4,5" x 7/8"

- Piedra abrasiva grano 24 fija, longitud de tornillo 60 mm, 50 x 20 mm
- Piedra abrasiva grano 24 fija, longitud de tornillo 60 mm, 40 x 20 mm
- Disco porta lijas
- Fresas metálicas triangulares cortas y largas
- Fresas metálicas cilíndricas
- Fresas metálicas esféricas



**Figura 4.3 Herramientas para pulido**

## TORNO VERTICAL

**TABLA 15**

### **CARACTERÍSTICAS DEL TORNO VERTICAL**

Diámetro del plato	4000	mm
Peso admisible sobre la mesa	20000	kg
Velocidad del plato	118	min-1
Potencia de torneado	102	kW
Máximo diámetro de torneado	4300	mm
Altura de torneado	3600	mm
Sección ram	310 X 310	mm

Diámetro mínimo de mandrilado	350	mm
Recorrido eje "z"	2000	mm
Potencia de fresado	37	kW
Velocidad máxima cabezal de fresado	2500	min-1
Avances rápidos "x" y "z"	10	m/min
Peso total de la máquina	80000	kg



**Figura 4.4 Torno vertical**

#### KIT DE TINTAS PENETRANTES

Kit para la detección de grietas, fisuras, errores de soldadura y otras fallas en piezas de fundición, forja, soldaduras, recipientes sometidos a presión o cualquier área sometida a gran stress.



**Figura 4.5 Kit de tintas penetrantes**

## EQUIPO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

### *Yugo*

El yugo de partículas magnéticas AC/DC debe estar diseñado para la inspección portátil por una persona, por medio de partículas magnéticas, de partes ferrosas. Ideal para la inspección de soldaduras y otras pruebas remotas. Las dos patas articuladas de los yugos se deben adaptar al contorno de la pieza para garantizar buen contacto.



### **Figura 4.6 Yugo usado para la inspección por partículas magnéticas**

#### *Lámpara UV*

Debe ser diseñada específicamente para maximizar la capacidad de detección con partícula magnética, altamente durable y fácil de usar. La lámpara debe ser ligera y ergonómica, de gran intensidad y alto rendimiento. Polvos, estuche portátil, marcador de pintura, lavado de manos, bombilla para atomización de polvo



### **Figura 4.7 Lámpara UV y polvos para inspección de partículas magnéticas**

#### **PUENTE GRÚA**

Capacidad del puente grúa: 20 Toneladas.

Dos velocidades de elevación.

Luz de 15m.



**Figura 4.8 Modelo de puente grúa**

#### EQUIPO DE BALANCEAMIENTO ESTÁTICO

Tipo: Sistema de barras paralelas

Altura Máxima: Regulable hasta rodets de 4000 mm

Ancho máximo: Regulable hasta 3000 mm

Peso máximo a soportar: 20 Toneladas

Precisión:  $\pm 0,02$  mm

Debe ser soldado todo el conjunto y rectificado las barras paralelas sobre las que se asentarán el eje con el rodete.

Placa de soporte: Como base del dispositivo se colocara una placa de acero al carbono de 2500 x 3500 x 40 mm de espesor fijado directamente al piso mediante pernos y tacos hilti, adecuadamente nivelada. La placa debe tener un dispositivo para izaje distribuido

uniformemente de manera que se pueda elevar sin afectar la integridad de la plancha.

Soporte de rieles de rodadura: El soporte principal consiste en una estructura sólida colocada inmediatamente en la parte superior de la plancha. Esta estructura debe tener la superficie de asentamiento rectificadas para garantizar la nivelación sobre la plancha. Además en la parte superior también debe ser rectificadas.

Rieles de rodadura: Los rieles deben ser de acero, rectificadas la zona de contacto con el eje del rodete. También tienen que ser pintados con pintura anticorrosiva.

Eje rodante:

**TABLA 16 CARACTERÍSTICAS DEL EJE RODANTE**

Tamaño de rodetes	Diámetro del eje
mayor a 15 toneladas	300 mm
entre 10 - 15 toneladas	200 mm

menores a 10 toneladas	100 mm
------------------------	--------

Bridas de soporte: Las bridas ayudarán a fijar el rodete con el eje, se deben fabricar con el diámetro exterior en ajuste con la parte interior del rodete y con el diámetro exterior del eje.

Los tornillos son 4 por brida y se los coloca de manera que los de una brida queden desfasados 45° con respecto a la otra.



**Figura 4.9 Modelo de Sistema de Balanceamiento estático**

#### HORNO

Con un sistema de alimentación ininterrumpida de hasta 4 h.  
Sistema de monitoreo y control, pantalla de monitoreo interface para usuario.

Potencia 300 KW, 480 V, trifásico

Dimensión de 5000 x 5000 x 2500 mm

Temperatura máxima de 650 °C

Control de temperatura automático programable para ajuste de curvas de TT.

### **Especificaciones del espacio en el taller**

Se realiza un detalle de cuáles serán las áreas designadas para hacer la reparación de los rodets de acuerdo a las características de los equipos que se han preseleccionado, así como el tamaño de los rodets que se tiene pensado acoger para realizar las reparaciones de rodets Francis.

El tamaño del taller es de 15 x 22.5 m y tendrá el siguiente tamaño de áreas para las diferentes actividades:

- Cubículos de pulido 5000 x 5000 x 3000mm extracción puntual
- Cubículo de soldadura 5000 x 5000 x 3000mm, extracción puntual.
- Sistema de balanceo estático de barras paralelas un área de 2500 x 3500 x 3000mm, tolerancia de 0,02 m
- Horno de tratamiento térmico 5000 x 5000 x 2500mm
- Mesas de trabajo
- Bodega de herramientas
- Torno Vertical diámetro plato 4000mm, altura torneado 3600mm

- Oficinas administrativas del taller

En el Plano 1 se presentara un plano esquemático donde se detallan las áreas específicas y la distribución en el taller de manera que no haya conflictos con su ubicación.

En las áreas de pulido y soldadura se colocarán extractores puntuales de polvo para que no afecte a los equipos eléctricos que estarán presentes en el taller.

#### **4.2. Proceso de reparación del rodete**

Se va describir el proceso que se debe seguir para la reparación completa del rodete, luego de que se haya desmontado de la turbina y se encuentre en un área donde se pueda acceder con facilidad para poder realizar las inspecciones del caso, así como contar con toda la información técnica dada por el fabricante del rodete.

#### **INSPECCIÓN VISUAL**

La Inspección Visual se divide en dos: la inspección visual en el sitio de procedencia y la inspección visual en el taller de reparación.

El proceso de reparación de todo rodete hidráulico y el de cualquier pieza de una turbina hidráulica empieza con la inspección inicial en el sitio de procedencia de la misma. La inspección visual en sitio permite observar cuál es la condición preliminar en la que se encuentran las partes, para una adecuada

evaluación de los trabajos de reparación que se deben realizar, se toman en cuenta ciertos parámetros técnicos.

Una persona especializada debe hacer la inspección en sitio del rodete, controlando principalmente el estado de las superficies de las caras de los álabes fijos del rodete. La inspección en sitio servirá para tener un conocimiento claro de la historia detrás de la pieza a reparar.

Una vez que el técnico especializado haya hecho una evaluación y recolectado toda la información técnica necesaria para poder aceptar efectuar la reparación de la pieza, se procede a movilizar la pieza hasta el sitio donde se va a llevar a cabo la recuperación total; con todas las precauciones del caso para que no sea afectado de ninguna manera la evaluación que se realizó en el sitio de trabajo con la que se va a realizar en el lugar donde se la va a reparar.

Al momento de realizar la inspección visual en sitio se registran archivos fotográficos y en especial uno con los siguientes datos:

- Empresa
- Tipo de Rodete
- Fecha de Inspección
- Diámetro y Longitud de la turbina
- Peso nominal
- Código de fabricación

- Material
- Numero de alabes



**Figura 4.10 Levantamiento de archivo fotográfico  
Requerimientos técnicos**

Para la inspección es necesario tener la siguiente información:

- Planos de medidas detalladas
- Plantillas entregadas por fabricantes
- Plano de ubicación de plantillas
- Carta de tratamiento térmico
- Histórico de reparaciones anteriores
- Ubicación del rodete para acceso total al mismo.

Todos los requerimientos son de suma importancia, ya que la falta de alguno de ellos puede causar que el proceso de recuperación no se lleve a cabo.



**Figura 4.11 Plantillas del rodete**

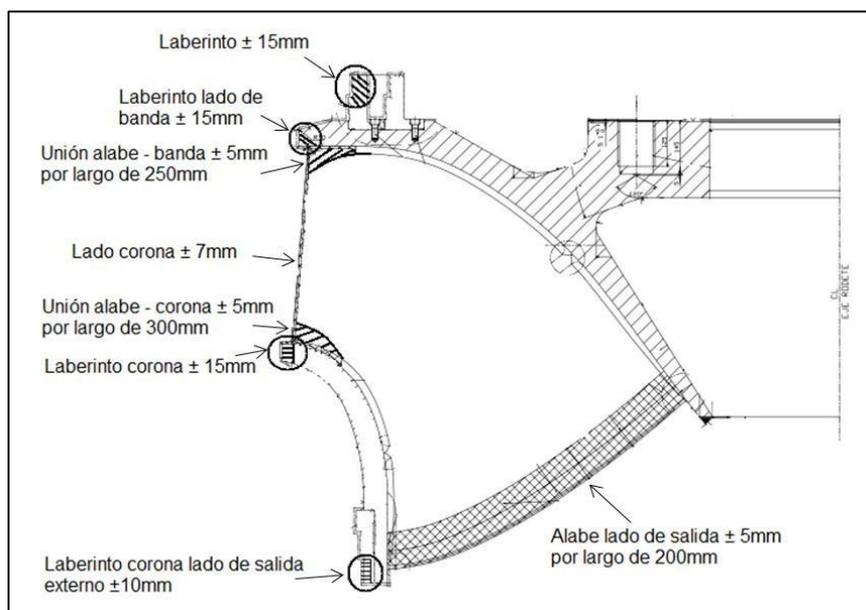
## Procedimiento

Procedimiento de Inspección Visual en sitio				
Actividad	Descripción	Herramienta	Tiempo (h)	Observaciones
1	Limpieza integral de todo el rodete.	Agua, liencillo, deja y desengrasante.	1.5	Colocar el rodete sobre bases para permitir el fácil acceso a la parte interna del mismo.
2	Inspección de la corona zona de ingreso del agua.	Marcador para metal, planos de rodete y calibrador bernier.	0.25	En la Figura 4.12 se observan los desgastes admisibles de cada zona.
3	Inspección de la banda zona de ingreso del agua.	Marcador para metal, planos de rodete y calibrador bernier.	0.25	
4	Enumeración de los alabes.	Marcador para metal.	0.1	Asignarle un número para poder identificarlos.

5	Inspección de la superficie de los alabes del rodete de ambos lados, la zona de soldadura del alabe fijo con la corona desde la parte de ingreso hasta la salida del agua y la zona de soldadura del alabe fijo con la banda desde la parte de ingreso hasta la salida del agua.	Marcador para metal y planos de rodete.	1	En la Figura 4.12 se observan los desgastes admisibles de cada zona.
---	--	---	---	--

<b>Procedimiento de Inspección Visual en sitio</b>				
				<b>Rev: 1</b>
<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Herramienta</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Observaciones</b>
6	Inspección de la zona de salida de los alabes, parte interna del rodete.	Marcador para metal y planos de rodete.	1	En la Figura 4.12 se observan los desgastes admisibles de cada zona.
7	Control dimensional del rodete.	Plantillas, plano de ubicación de plantillas, calibrador vernier y flexómetro.	2	Registrar el desgaste en cada zona del rodete y registrarlo para tener constancia de cuanto material se necesita aportar.
8	Control de la dureza en tres zonas del rodete	Histórico de reparaciones del rodete, durómetro.	0.1	Se realiza la prueba en la banda, la corona y el alabe del rodete.

				Diferencia entre la dureza de las diferentes partes del rodete debe ser máxima de 40 HB.
9	Levantamiento fotográfico de las zonas marcadas y registro del histórico del rodete.	Cámara fotográfica	0.5	Hacer tomas de las partes más afectadas del rodete y de los datos más importantes de los mismos.



**Figura 4.12** Desgastes admitidos en las partes del rodete



## **Figura 4.13 Uso de plantillas y control dimensional**

84

### **Recurso humano**

- Técnico Especialista
- Técnico ayudante para la inspección
- Técnico de la central con conocimiento histórico del rodete

### **CONTROLES NO DESTRUCTIVOS**

Los ensayos no destructivos que se realizarán son: tintas penetrantes y partículas magnéticas, en base a la Norma CCH 703 Specification for inspección of Steel Castings for Hydraulic Machines.

### **Requerimientos técnicos**

- Zona confinada
- Aireación adecuada
- Área iluminada
- Conexiones eléctricas adecuadas
- Área con piso recubierto
- Posición horizontal del rodete

Rodete completamente limpio



## Procedimiento

Procedimiento de Ensayo de Tintas penetrantes				
				Rev: 1
Actividad	Descripción	Herramienta	Tiempo (h)	Observaciones
1	Limpieza integral de todo el rodete.	Agua, liencillo, deja y desengrasante.	1.5	Colocar el rodete sobre bases para permitir el fácil acceso a la parte interna del mismo.
2	Colocar protección en el piso.	Cartón o plástico	0.1	Que toda el área del rodete quede bien cubierta para que no se manche el piso.
3	Enumeración de los alabes.	Marcador para metal.	0.1	Asignarle un número para poder identificarlos.
4	Aplicar el líquido penetrante a todo el rodete.	Líquido penetrante	0.5	Esperar a que se seque el líquido en todo el rodete según recomendaciones del fabricante del líquido penetrante entre 15-20 minutos.
5	Limpieza de todo el rodete del líquido.	Liencillo y agua	0.2	

<b>Procedimiento de Ensayo de Tintas penetrantes</b>				
				<b>Rev: 1</b>
<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Herramienta</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Observaciones</b>
6	Aplicar el líquido revelador en todo el rodete.	Líquido revelador	0.5	Esperar a que se seque el líquido en todo el rodete según recomendaciones del fabricante del líquido revelador 10 minutos.
7	Observar donde quedan las marcas del líquido penetrante.		0.5	
8	Encerrar las discontinuidades.	Marcador para metal.	0.25	
9	Aceptación de las discontinuidades de acuerdo a la Norma CCH 70-3			





**Figura 4.14 Aplicación de líquidos penetrantes**



**Figura 4.15 Apertura de discontinuidades**



<b>Procedimiento de Ensayo de Partículas Magnéticas</b>				
				<b>Rev: 1</b>
<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Herramienta</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Observaciones</b>
1	Limpieza integral de todo el rodete.	Agua, liencillo, deja y desengrasante.	1.5	Colocar el rodete sobre bases para permitir el fácil acceso a la parte interna del mismo.
2	Colocar protección en el piso.	Cartón o plástico	0.1	Que toda el área del rodete quede bien cubierta para que no se manche el piso.
3	Calentar la lámpara UV	Lámpara UV	0.25	
4	Cubrir el área alrededor de la zona donde se va a inspeccionar.	Manta negra		Cubrir bien toda la zona para que se pueda realizar una buena inspección.
5	Aplicar el líquido del kit de partículas magnéticas a la superficie y usando el yute, magnetizar el material por tres segundos con la ayuda de la lámpara UV observar las deformaciones	Líquido fluorescente, lámpara UV, yute.	0.5	Colocar el yute en diferentes posiciones para poder encontrar posibles fisuras.
6	Encerrar las discontinuidades.	Marcador para metal.	0.25	

<b>Procedimiento de Ensayo de Partículas Magnéticas</b>				
				<b>Rev: 1</b>
<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Herramienta</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Observaciones</b>
7	Aceptación de las discontinuidades de acuerdo a la Norma CCH 70-3			Esperar a que se seque el líquido en todo el rodete según recomendaciones del fabricante del líquido revelador 10 minutos.



**Figura 4.16 Inspección por partículas magnéticas**

### **PULIDO INICIAL**

Se realiza el desbaste para eliminar las aristas más sobresalientes en el perfil de los alabes, la zona del laberinto de la corona y de la banda, así como en las uniones de los alabes con la banda y la corona.

### **Requerimientos técnicos**

- Ventilación adecuada
- Buena iluminación
- Conexiones eléctricas adecuadas
- Medidas dimensionales
- Planos del rodete



## Procedimiento

Procedimiento de Pulido				
				Rev: 1
Actividad	Descripción	Herramienta	Tiempo (h)	Observaciones
1	Se preparan los equipos que se van a utilizar y colocación de los epp's.	Amoladoras, rectificadoras, convertidor de alta frecuencia.	0.33	Tener a la mano los equipos que se van a utilizar y colocarse los epp's: mascarilla, protector facial, guantes ropa adecuad, botas.
2	Apertura de los defectos encontrados en los ensayos no destructivos.	Rectificadora, fresas metálicas cilíndricas, esféricas, triangulares cortas y largas.	64	
3	Pulido de la parte externa de la corona y la banda con las amoladoras angulares	Amoladoras angulares, lijas rotativas circular grano 80 diam=50mm, grano 60 diam=50mm, diam=40, diam=30mm.	160	
4	Pulido de partes donde se observen desgastes profundos.	Rectificadora, fresas metálicas cilíndricas, esféricas, triangulares cortas y largas.	60	

5	Pulido de la zona de soldadura de los alabes con la banda y la corona,	Amoladora angular, lija rotativa plana grano 40	86	
---	--	---	----	--



**Figura 4.17** Uso de las amoladoras y rectificadoras



**Figura 4.18** Pulido del laberinto de la corona

## **SOLDADURA DEL RODETE**

Por medio de la soldadura se va a realizar la recuperación de las medidas del material faltante del rodete, se aporta a los laberintos de la corona y la banda así como en la zona de entrada y salida de los alabes. Las zonas reparadas deben quedar sobre medida aproximadamente +3mm.

### **Requerimientos técnicos**

- Ventilación adecuada
- Área iluminada
- Conexiones eléctricas adecuadas □ Medidas dimensionales del rodete
- 4 soportes de 600 mm.
- 4 soportes de 1250 mm.
- Bases de madera.

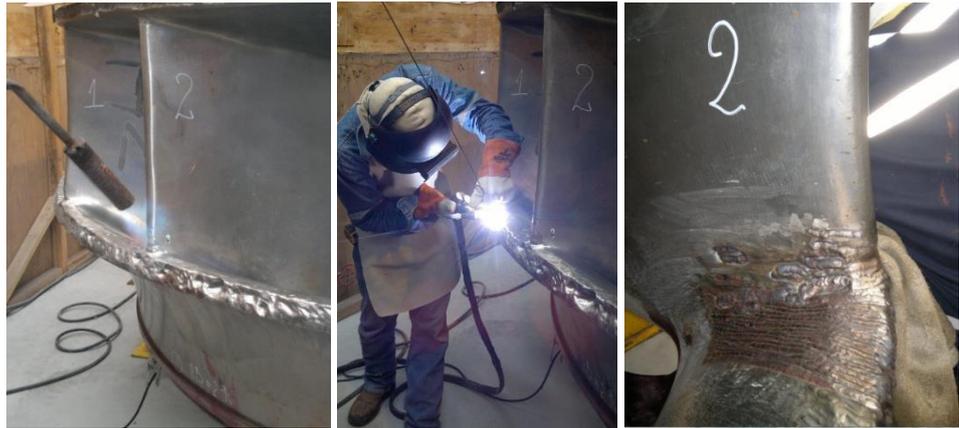


## Procedimiento

Procedimiento de Soldadura				
				Rev: 1
Actividad	Descripción	Herramienta	Tiempo (h)	Observaciones
1	Se preparan los equipos que se van a utilizar y colocación de los epp's.	Soldadora, soldadura tig y electrodos.	0.3	Tener a la mano los equipos que se van a utilizar y colocarse los epp's: mascarilla, gorro, mascara de soldar, guantes de cuero, ropa adecuada para soldadura.
2	Calibrar la máquina de soldar	Soldadora, cilindro de argón, manómetro.	0.1	
3	Colocar el rodete sobre soportes del lado de la corona.	Soportes de 600 mm de alto	0.1	En el plano 2 se encuentran los soportes dibujados.
4	Calentar la zona del rodete en la que se va a soldar hasta uno 50°C.	Mechero, cilindro de gas industrial, antorcha para calentar, pirómetro.	0.5	Calentar de manera uniforme toda la zona donde se va a realizar el relleno con soldadura.
5	En la zona del laberinto de la corona, se rellena con soldadura TIG las partes donde se realizó el pulido puntual con las fresas metálicas.	Soldadora TIG, electrodo de tungsteno y aporte TIG de acero inoxidable ER 410NiMo 3/32" x 36"	24	Controlar la temperatura de superficie del rodete que no exceda los 90 °C.

Procedimiento de Soldadura				
				Rev: 1
Actividad	Descripción	Herramienta	Tiempo (h)	Observaciones
6	Rellenar con soldadura TIG alrededor de los alabes fijos en la unión con la corona y la banda.	Soldadora TIG, electrodo de tungsteno y aporte TIG de acero inoxidable ER 410NiMo 3/32" x 36"	40	Controlar la temperatura de superficie del rodete que no exceda los 90 °C.
7	En la zona del laberinto de la corona, luego de haber rellenado con soldadura TIG, con electrodo hasta 3 mm más de la medida nominal del rodete.	Soldadora de electrodo, electrodo E410 NiMO-15, diámetro= 3.25 mm.	40	Controlar la temperatura de superficie del rodete que no exceda los 90 °C.
8	Soldar con electrodo 120 mm desde el filo de entrada en la parte de la corona hacia la parte interior del laberinto de forma perpendicular a la entrada del agua.	Soldadora de electrodo, electrodo E410 NiMO-15, diámetro= 3.25 mm.	40	Controlar la temperatura de superficie del rodete que no exceda los 100°C.
9	Colocar el rodete sobre los soportes de 1250 mm asentado del lado de la corona.	Soportes de 1250 mm.	0.1	En el plano 2 se encuentran los soportes dibujados.
10	Soldar la parte interna de los alabes desde el filo hacia la parte de entrada del agua una franja de 150 mm.	Soldadora de electrodo, electrodo E410 NiMO-15, diámetro= 3.25 mm.	52	Controlar la temperatura de superficie del rodete que no exceda los 90 °C.

<b>Procedimiento de Soldadura</b>				
				<b>Rev: 1</b>
<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Herramienta</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Observaciones</b>
11	Colocar el rodete de manera vertical sobre soportes de madera	Soportes de madera	0.1	
12	Soldar los alabes del lado de la corona, laberinto parte superior y banda.	Soldadora de electrodo, electrodo E410 NiMO-15, diámetro= 3.25 mm.	44	



**Figura 4.19 Calentamiento y soldadura de rodete Francis**

### **MECANIZADO**

En este paso se realiza el desbaste de las zonas soldadas para que quede sobre medida +1 mm sobre la superficie del rodete.

### **Requerimientos técnicos**

- Planos del rodete
- Medidas dimensionales

## Procedimiento

Procedimiento de Maquinado				
				Rev: 1
Actividad	Descripción	Herramienta	Tiempo (h)	Observaciones
1	Encender el torno vertical	Torno vertical		
2	Fijar la pieza en el torno vertical.	Torno vertical	0.1	
3	Iniciar el proceso de torneado en las zonas donde se rellenó con soldadura, con +1mm sobre medida nominal	Torno vertical, planos del rodete.	16	Ingresar el diseño del rodete en cad para que el torno pueda darle las medidas exactas del rodete.



**Figura 4.20 Rodete en el torno vertical**

## **TRATAMIENTO TÉRMICO**

Se realiza el tratamiento térmico de alivio de tensiones

### **Requerimientos técnicos**

- Planos del rodete
- Conexiones eléctricas adecuadas
- Tratamientos térmicos anteriores

## Procedimiento

Procedimiento de Tratamiento Térmico				
				Rev: 1
Actividad	Descripción	Herramienta	Tiempo (h)	Observaciones
1	Ingresar e rodete en el horno	Horno	0.17	Con el uso de la grúa ingresar el rodete lentamente en el horno de tratamiento térmico.
2	Programar el horno para que tenga un ascenso en la temperatura de 50°C/h partiendo desde la temperatura ambiente.	Horno	24	
3	Verificar que la temperatura se mantenga en ascenso constante hasta llegar a 20°C menos del último tratamiento térmico.	Horno	5	En caso de que se le realice por primera vez el tratamiento térmico, la temperatura a llegar será de 590 °C.
4	Programar el horno para que el descenso de temperatura también se realice a razón de 50 °C/h hasta llegar a la temperatura ambiente.	Horno	9	Mantener el rodete en el horno hasta que se enfríe a la temperatura ambiente.
5	Elaborar el certificado de tratamiento térmico.		0.25	



**Figura 4.21 Rodete ingresando al horno de tratamiento térmico**

### **BALANCEAMIENTO ESTÁTICO**

Una vez terminado el mecanizado de acabado del diseño, con las medidas de los planos y con el uso de planillas se realizara el balanceamiento estático. El balanceamiento estático se realizará por el método de barras paralelas de acuerdo a la norma ISO 1940-1.

#### **Requerimientos técnicos**

- Ventilación adecuada
- Área iluminada
- Posición vertical del rodete

## Procedimiento

Procedimiento de Balanceamiento estático				
				Rev: 1
Actividad	Descripción	Herramienta	Tiempo (h)	Observaciones
1	Colocar el rodete en posición horizontal	Puente grúa	0.17	
2	Introducir el eje en el rodete por el lado de la banda.	Eje	0.17	Eje macizo de 2m de largo y diámetros variable de acuerdo al peso del rodete que se vaya a levantar.
3	Insertar dos bridas en el eje, una primero por el lado de la corona y la segunda por el lado de la banda.	2 Bridas	0.1	Asignarle un número para poder identificarlos. planchas para las bridas son de acero al carbono dependiendo del peso son de 40, 30 o 20 mm de espesor
4	Regular la simetría del eje con una tolerancia de $\pm 30$ mm.	Eje, Flexómetro.	0.17	
5	Colocar los espárragos en las bridas del lado de la corona y banda cada $90^\circ$ , entre brida y brida deben estar desfasados $45^\circ$ .	Bridas, espárragos.	0.25	Se colocan con un desfase de $45^\circ$ para tener un mejor ajuste. Los pernos son de $\varnothing 20$ mm
6	Colocar fajas a ambos lados del eje para izar el rodete.	Eje, fajas.	0.17	

## Procedimiento de Balanceamiento estático

				Rev: 1
Actividad	Descripción	Herramienta	Tiempo (h)	Observaciones
7	Transportar el conjunto hacia el sistema de balanceamiento estático de barras paralelas.	Puente grúa	0.25	
8	Colocar el conjunto sobre el sistema de balanceamiento estático en una esquina al inicio de los rieles.	Sistema de balanceamiento estático.	0.25	Colocarlo siempre al inicio del riel del sistema de balanceamiento estático.
9	Hacer girar el rodete hasta la mitad de las barras.	Sistema de balanceamiento estático.	4	
10	Soltarlo en la mitad de las barras y dejarlo girar libremente.	Sistema de balanceamiento estático.		Se adjunta plano 3 donde se encuentra el sistema de balanceamiento estático.
11	Marcar el lado donde está más pesado.	Sistema de balanceamiento estático.		El lado más pesado va a ser el que necesite ser balanceado.
12	A 180° del lugar marcado se colocan pesos en la parte de la banda para equiparar el peso del rodete.	Sistema de balanceamiento estático, imanes de 1-5Kg, pesos.		
<b>Procedimiento de Balanceamiento estático</b>				

				<b>Rev: 1</b>
<b>Actividad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Herramienta</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Observaciones</b>
13	Pulir la parte pesante, del lado de la corona externa hasta 10 mm de profundidad en franja de 200 mm de largo.	Amoladora angular, lija rotativa circular grano 60.		
14	Elaborar un certificado de balanceamiento estático.		0.25	

# CAPÍTULO 5

## 5. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se procederá a realizar un análisis financiero de la construcción de un taller industrial para la reparación de rodets de la turbina Francis, se mostrará en detalle todos los costos que demanda y se calculará período de recuperación de la inversión, con el único fin de demostrar la viabilidad económica del proyecto. Para el presente estudio se establecerá un plazo de 10 años.

### 5.1. Presupuesto para la implementación del taller industrial

#### **Especificaciones**

El taller especializado que se construirá podrá reparar rodets de máximo 20 toneladas y Ø 4m.

## Inversión Inicial

La inversión inicial del proyecto está basada en la adquisición del terreno, el cual tiene una superficie de 337.5 m<sup>2</sup>, las obras necesarias para el asentamiento y construcción de taller; además del equipamiento del mismo.

**TABLA 17 INVERSIÓN INICIAL**

Inversiones	Cantidad	Unidad	Valor/Unidad	Monto Total
Terrenos	337,50	m2	\$ 120,00	\$ 40.500,00
Construcciones	337,50	m2	\$ 250,00	\$ 84.375,00
<b>Maquinaria - Equipamiento</b>				
<i>Torno vertical</i>	1	Unidad	\$ 2.750.000,00	\$ 2.750.000,00
<i>Puente grúa</i>	1	Unidad	\$ 80.000,00	\$ 80.000,00
<i>Equipo de balanceamiento estático</i>	1	Unidad	\$ 50.000,00	\$ 50.000,00
<i>Horno</i>	1	Unidad	\$ 450.000,00	\$ 450.000,00
<i>Herramientas</i>	1	Unidad	\$ 25.000,00	\$ 25.000,00
<i>Extractores</i>	2	Unidad	\$ 6.937,81	\$ 13.875,62
<i>Soldadoras</i>	4	Unidad	\$ 8.000,00	\$ 32.000,00
<i>Amoladoras</i>	4	Unidad	\$ 350,00	\$ 1.400,00
<i>Rectificadoras</i>	4	Unidad	\$ 250,00	\$ 1.000,00
<i>Yugo y lámpara UV</i>	2	Unidad	\$ 5.000,00	\$ 10.000,00
<b>(+) Subtotal Equipamiento</b>				<b>\$ 3.413.275,62</b>
<b>Total</b>				<b>\$ 3.528.150,62</b>

La depreciación de las inversiones realizadas son las siguientes: maquinarias 10% y construcción 5%.

**TABLA 18 DEPRECIACIÓN DE MAQUINARIA Y CONSTRUCCIÓN ANUAL**

Activo	Valor de Compra	Vida Contable	Depreciación Anual	Depreciación Acumulada	Valor en libros
Terreno	\$ 40.500,00				\$ 45.000,00

Construcciones	\$ 84.375,00	20	\$ 4.218,75	\$ 42.187,50	\$ 42.187,50
Maquinaria	\$ 3.413.275,62	10	\$ 341.327,56	\$ 3.413.275,62	\$ -

### **Costos Directos**

En esta categoría se incluyen todos aquellos costos que influyen de forma directa en el proceso de reparación, estos son: mano de obra directa, materiales, gastos operacionales y servicios a terceros. El total de costos directos por reparación es de \$49.027,50

### **Costos Indirectos**

Los costos indirectos de fabricación como lo indica su nombre son todos aquellos costos que no se relacionan directamente con la manufactura, pero forman parte del costo final de producción, esto es: mano de obra indirecta, energía eléctrica y gastos administrativos. El total de costos indirectos es de \$ 42.980.

En el Anexo E se adjunta el detalle de costos directos e indirectos.

### **Costos Fijos**

Los costos fijos representan la utilización y por ende desgaste de la estructura durante las reparaciones. Se procedió a descontar en

partes iguales a lo largo del período del proyecto la cuantía de las inversiones, obteniendo un total de \$ 352.815,06 por año.

### **Flujo de Caja**

Se propone como supuesto que la tasa de crecimiento anual de los costos de mano de obra directa será igual a 10% y el costo de mano indirecta incrementará en un 7%. Los precios y demás costos se ajustarán anualmente de acuerdo a una inflación del 4.05%.

La tasa de descuento del flujo de caja es del 10%, este porcentaje se lo obtiene en base de otros estudios de ingeniería. El flujo de caja se muestra en el Anexo F.

### **Valor Actual Neto**

Es el mejor método conocido y más generalmente aceptado por los evaluadores de proyectos. Mide la rentabilidad del proyecto en valores monetarios que exceden a la rentabilidad deseada después de recuperar toda la inversión. Para ello, calcula el valor actual de todos los flujos futuros de caja proyectados a partir del primer período de operación y le resta la inversión total expresada en el momento cero.

Como resultado se obtuvo un Valor Actual Neto (VAN) superior a cero; igual a \$ 3.203.478,35 lo que es igual a cuánto se gana con el proyecto, después de recuperar la inversión, por sobre la tasa del

10% que se exigió de retorno al proyecto, el proyecto es viable. **Tasa**

### **Interna de Retorno**

Otro criterio de evaluación lo constituye la tasa interna de retorno, TIR, que mide la rentabilidad como un porcentaje. Es la tasa de descuento que iguala el valor equivalente de una alternativa de flujos de entrada de efectivo (ingresos o ahorros) al valor equivalente de flujos salientes de efectivo (egresos, incluidos los costos de inversión). La TIR obtenida fue de 26%.

### **Período de Recuperación de la Inversión (Payback)**

Tiene por objeto medir en cuánto tiempo se recupera la inversión, incluyendo la tasa de retorno exigida.

**TABLA 19 PAYBACK**

<b>Período Años</b>	<b>Saldo Inversión</b>	<b>Flujo de Caja</b>	<b>Rentabilidad Exigida</b>	<b>Recuperación de Inversión</b>
1	\$ 3.528.150,62	\$ 768.312,41	\$ 352.815,06	\$ 415.497,34
2	\$ 3.112.653,28	\$ 783.683,02	\$ 311.265,33	\$ 472.417,69
3	\$ 2.640.235,58	\$ 1.013.149,13	\$ 264.023,56	\$ 749.125,57
4	\$ 1.891.110,01	\$ 1.036.682,81	\$ 189.111,00	\$ 847.571,81
5	\$ 1.043.538,20	\$ 1.060.794,99	\$ 104.353,82	\$ 956.441,17
6	\$ 87.097,03	\$ 1.085.470,84	\$ 8.709,70	\$ 1.076.761,14
7	\$ (989.664,10)	\$ 1.354.578,01	\$ (98.966,41)	\$ 1.453.544,42
8	\$ (2.443.208,53)	\$ 1.388.238,87	\$ (244.320,85)	\$ 1.632.559,72
9	\$ (4.075.768,24)	\$ 1.422.514,78	\$ (407.576,82)	\$ 1.830.091,61
10	\$ (5.905.859,85)	\$ 1.812.551,99	\$ (590.585,99)	\$ 2.403.137,97

El Payback descontado, muestra que la recuperación de la

inversión se hará efectiva en el sexto año.

## **5.2. Evaluación de la Inversión**

La construcción de un taller industrial para la reparación de rodetes Francis, representa una inversión inicial considerablemente alta. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que este valor compensa las numerosas reparaciones en el exterior de las que se prescindiría.

La reparación de un rodete en el exterior implica costos adicionales como los que genera la logística de movilizar el rodete fuera del país. Estos costos se ahorrarían en un mediano a largo plazo con la implementación del taller.

La construcción del taller beneficiaría no solo a la Central Hidroeléctrica, sino al resto de centrales del país, acapararía un mercado nuevo que incluso puede generar futuros ingresos adicionales para la Central.

Con la experiencia de técnicos que procedan con las reparaciones a los rodetes, y contando con tecnología avanzada, se espera que las centrales hidráulicas del país eviten las grandes inversiones que representan las compras de nuevos rodetes; además del tiempo que se puede ahorrar, y opten por la reparación de los mismos aquí en el país.

# CAPÍTULO 6

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Se elaboró un procedimiento de inspección y reparación de rodetes Francis en base a la consultoría de un experto en turbinas hidráulicas y a la investigación exhaustiva de información técnica.
- Con la creación de este procedimiento se ofrece una guía que sirva de referencia para los técnicos del taller de la central, de esta manera podrán efectuar una reparación óptima que se vea reflejada en el rendimiento de la turbina.
- Una vez establecido el procedimiento que se debe llevar a cabo para la reconstrucción total del rodete Francis, se realizó

la selección de equipos y herramientas requeridos para el montaje del taller industrial.

- Además de los beneficios que aporta el taller industrial a la central por la reducción de costos en reparaciones en el exterior y la adquisición de nuevos rodets que suplanten a los deteriorados, este taller permite generar ingresos no operacionales adicionales; es decir, que no guardan relación con la actividad de generación de energía eléctrica. Esto debido a que no solamente se realizará la reparación de los rodets de la central, sino también de otras centrales del país. Por otro parte, realizando la reparación localmente se disminuye la fuga de divisas al exterior.
- La creación del taller además de optimizar recursos económicos, permite ahorrar tiempo en la logística que implicaba la movilización de los rodets Francis al exterior, incluyendo el embarque y trámites aduaneros de los mismos.
- Luego de realizar un análisis económico de la implementación del taller industrial para la reparación de rodets se pudo concluir que el proyecto es económicamente viable y rentable. Se obtuvo un Valor Actual Neto equivalente a \$3.203.478,35 y una Tasa Interna de Retorno del 26%. La inversión del taller se recuperará en 6 años.

## Recomendaciones

- Al momento de poner en marcha el proyecto, actualizar los costos de los equipos y materiales a utilizar.
- El manual de procedimientos debe ser actualizado de manera constante de acuerdo a las reparaciones que se realicen.
- Los técnicos que vayan a realizar la reparación deben ser calificados previamente por el técnico con mayor experiencia.
- Se recomienda que cuando se efectúen los mantenimientos, se realice la mayor cantidad de reparaciones puntuales en las zonas más críticas del rodete, de esta manera la recuperación total del mismo será menos costosa debido a que el porcentaje de desgaste será menor.

# **PLANOS ANEXO S**

**ANEXO A**

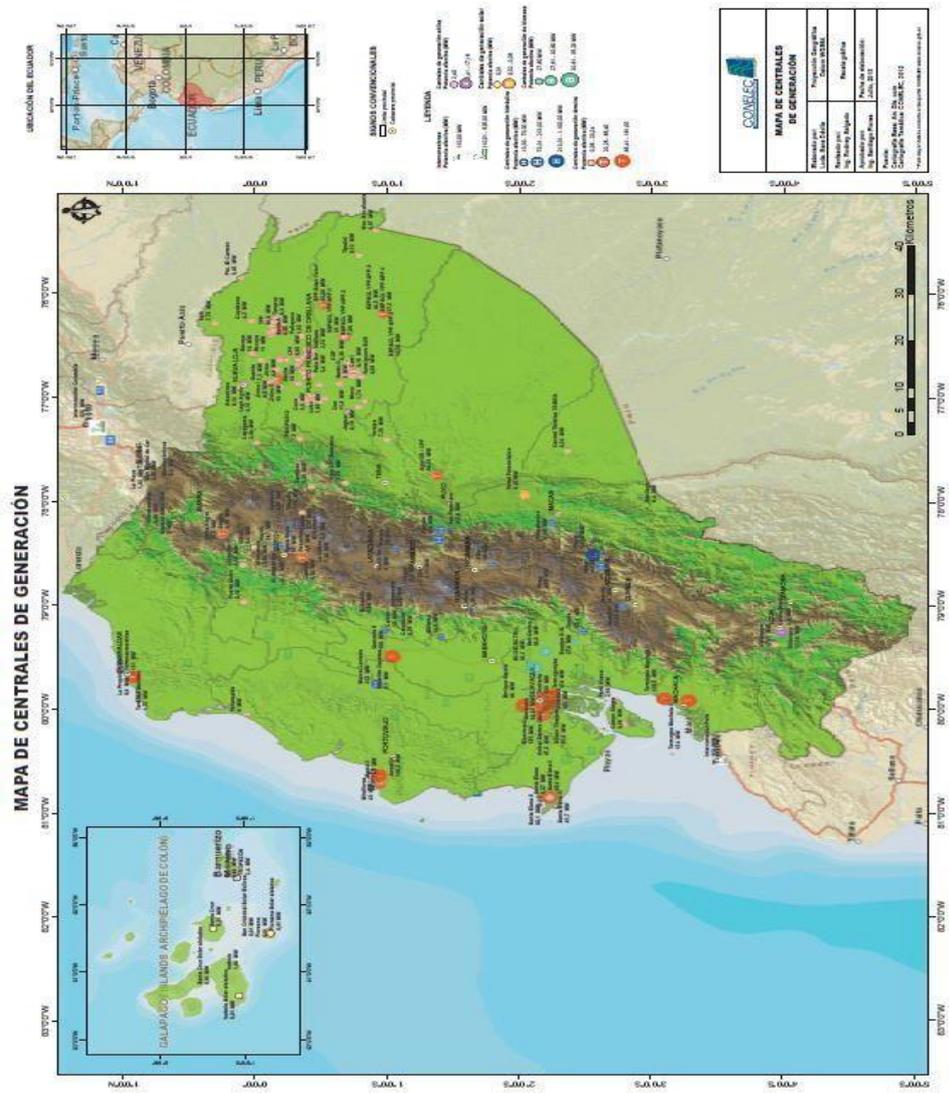
## INVENTARIO DE LAS EMPRESAS GENERADORAS DE ECUADOR SEGÚN EL TIPO DE CENTRAL

	Empresa	Central	Energías renovables		Energías no renovables		
			Hidráulica	Eólica	Térmica		
					MCI	Turbo - Gas	Turbo - Vapor
<b>Generadoras</b>	CELEC-Electroguayas	Enrique García				X	
		Gonzalo Zevallos (Gas)				X	
		Gonzalo Zevallos (Vapor)					X
		Santa Elena II			X		
		Santa Elena III			X		
		Trinitaria					X
	CELEC-Hidroagoyán	Agoyán	X				
		Pucará	X				
		San Francisco	X				
	CELEC-Hidropaute	Mazar	X				
		Paute	X				
	CELEC-Termoesmeraldas	Jaramijó			X		
		La Propicia			X		
		Manta II			X		
		Miraflores			X	X	
		Pedernales			X		
		Termo-Esmeraldas					X
	Eólica	Tropezón		X			
	Generoca	Generoca			X		
	Hidronación	Marcel Laniado	X				
	CELEC-Termopichincha	Campo Alegre			X		
		Celso Castellanos			X		
		Guangopolo			X		
		Jivino I			X		
		Jivino II			X		
		Jivino III			X		
Payamino				X			
Puná Nueva				X			
Puná Viejo				X			
Quevedo II				X			
Sacha				X			
Santa Elena				X			

		Santa Rosa			X		
		Secoya		X			
	CELEC-Termogas Machala		Termogas Machala I			X	
			Termogas Machala II			X	
	Elecaastro		El Descanso		X		
			Ocaña	X			
			Saucay	X			
			Saymirín	X			
	Electroquil		Electroquil			X	
	EMAAP-Q		El Cármen	X			
			Noroccidente	X			
			Recuperadora	X			
	Hidosibimbe		Corazón	X			
			Sibimbe	X			
			Uravía	X			
	Termoguayas		Termoguayas		X		
	Intervisa Trade		Victoria II			X	

## ANEXO B

### MAPA CENTRALES DE GENERACIÓN



## ANEXO C

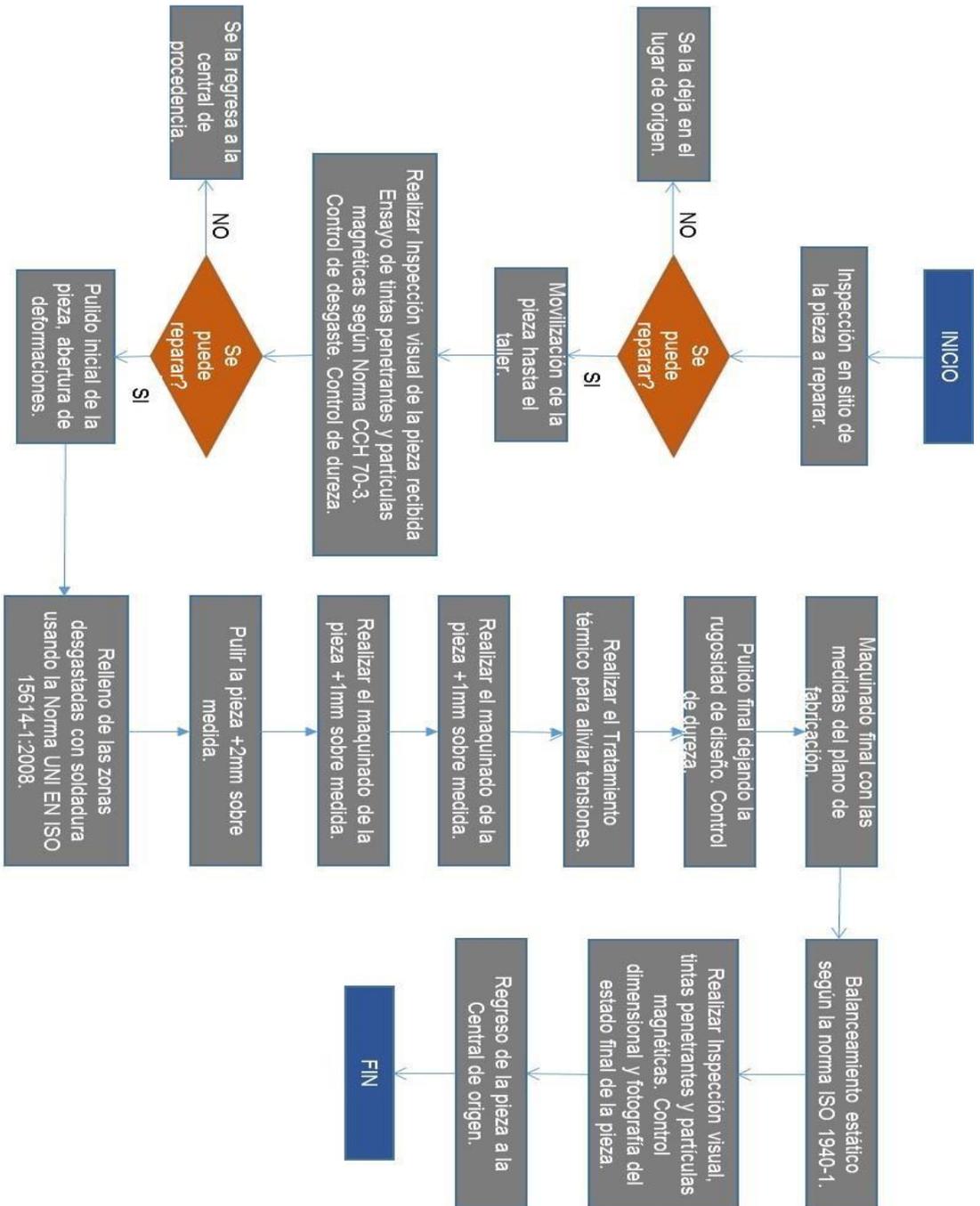
### CAUDAL MEDIO DEL RÍO PASTAZA (1997-2007)

Año	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>Mes</b>											
<b>Enero</b>	64.9	81.3	71.9	79.4	78.7	68.8	71.9	65	54.1	98.2	97.7

												124
<b>Febrero</b>	134.8	93.2	86.3	106.6	97.1	82.3	86.1	56	89.3	103.9	95.2	
<b>Marzo</b>	107.7	88.1	90.6	154.2	81.9	76.7	91.6	128.1	123	103.3	95.2	
<b>Abril</b>	104.1	163.3	97.8	173.2	132	106.3	96.8	105.9	194.6	115.9	150.2	
<b>Mayo</b>	165.8	132.3	161.3	296.5	113.5	141.5	162	144.7	104	107.5	138.7	
<b>Junio</b>	89.5	228.7	140.3	255.7	240.5	141.5	142.2	238.5	174.2	152.8	415.9	
<b>Julio</b>	194.5	273.1	147.5	166.6	143.3	177.5	141	139.5	125	116.7	101.3	
<b>Agosto</b>	114.9	137.6	89.5	150.7	151.2	139.2	89.9	148.5	77.3	129.7	166.3	
<b>Septiembre</b>	85.8	87.6	78.6	116.8	102.1	74.9	77.2	92	73.4	160	136.8	
<b>Octubre</b>	72.4	93.4	69.5	102.5	64.8	81.6	69.3	92.8	55.3	71.6	84.6	
<b>Noviembre</b>	114.2	95.7	67.7	60.7	63.1	142.9	68.6	86.6	66.4	90	118.7	<b>Diciembre</b>
	104.7	93.4	84.6	97	87.7							

## ANEXO D

### Procedimiento de reparación de rodete



## ANEXO E

### Detalle de costos

Cantidad	Unidad	Valor/Unidad	Total
----------	--------	--------------	-------

**Costos Directos****Materiales**

<i>Electrodos</i>	30	Paquete	\$	30,00	\$	900,00
<i>Botella Argon</i>	3	Unidad	\$	200,00	\$	600,00
<i>Aporte TIG</i>	50	Kg	\$	10,00	\$	500,00
<i>Consumible TIG</i>	4	Unidad	\$	200,00	\$	800,00
<i>Fresas</i>	10	Unidad	\$	30,00	\$	300,00
<i>Discos</i>	40	Unidad	\$	20,00	\$	800,00
<i>Kit de tintas penetrantes</i>	10	Unidad	\$	120,00	\$	1.200,00
<i>Líquido fluorescente</i>	4	Unidad	\$	60,00	\$	240,00
<i>Marcador de metal</i>	2	Unidad	\$	5,00	\$	10,00
<i>Liencillo</i>	5	Libras	\$	2,50	\$	12,50
<i>Desengrasante</i>	10	Galón	\$	7,00	\$	70,00
<i>Calibrador Bernier</i>	2	Unidad	\$	80,00	\$	160,00
<i>Flexómetro</i>	3	Unidad	\$	5,00	\$	15,00
<i>Cámara fotográfica</i>	1	Unidad	\$	700,00	\$	700,00
<i>Soportes</i>	8	Unidad	\$	150,00	\$	1.200,00
<i>Mechero</i>	3	Unidad	\$	50,00	\$	150,00
<i>Cilindro de gas</i>	4	Unidad	\$	15,00	\$	60,00
<i>Manómetro</i>	3	Unidad	\$	130,00	\$	390,00
<i>Fajas</i>	4	Unidad	\$	100,00	\$	400,00
<b>(+)Subtotal Materiales</b>					<b>\$</b>	<b>8.507,50</b>

**Mano de Obra Directa Técnico  
especialista en Soldadura**

	1	Hora	\$	8.000,00	\$	8.000,00
<i>Técnico encargado del taller</i>	1	Trabajador	\$	8.000,00	\$	8.000,00
<i>Soldadores</i>	2	Trabajador	\$	2.800,00	\$	5.600,00
<i>Pulidores</i>	2	Trabajador	\$	2.000,00	\$	4.000,00
<i>Tornero</i>	1	Trabajador	\$	2.400,00	\$	2.400,00
<b>(+)Subtotal Mano de Obra Directa</b>					<b>\$</b>	<b>28.000,00</b>

<b>Servicios a terceros</b>	1	Unidad	\$	7.000,00	\$	<b>7.000,00</b>	<b>Gastos Operacionales</b>
<i>Alimentación</i>	7	Unidad	\$	80,00	\$	560,00	
<i>EPPs</i>	7	Unidad	\$	400,00	\$	2.800,00	
<i>Movilización</i>	2	Unidad	\$	300,00	\$	600,00	
<i>Comunicación</i>	2	Unidad	\$	80,00	\$	160,00	
<i>Entrenamiento</i>	7	Unidad	\$	200,00	\$	1.400,00	
<b>(+) Subtotal Gastos Operacionales</b>					<b>\$</b>	<b>5.520,00</b>	

<b>Total de Costos Directos</b>				<b>\$</b>	<b>49.027,50</b>
<b>Costos Indirectos</b>					
<b>Mano de Obra Indirecta</b>					
<i>Asistente Administrativa</i>	2	Trabajador	\$	6.000,00	\$ 12.000,00
<i>Conserje</i>	1	Trabajador	\$	4.800,00	\$ 4.800,00
<b>(+)Subtotal Mano de Obra Indirecta</b>				<b>\$</b>	<b>16.800,00</b>
<b>Energía Eléctrica</b>	18.000	Kw/h	\$	0,08	\$ <b>1.440,00</b>
<b>Agua</b>	1.417	m3	\$	0,72	\$ <b>1.020,00</b>
<b>Gastos Administrativos</b>					
Telefonía Fija y Celular	1	Unidad	\$	840,00	\$ 840,00
Internet	1	Unidad	\$	480,00	\$ 480,00
Suministros de Oficina y cafetería	1	Unidad	\$	1.800,00	\$ 1.800,00
Suministros de Limpieza	1	Unidad	\$	1.200,00	\$ 1.200,00
Seguridad	1	Unidad	\$	12.000,00	\$ 12.000,00
Caja Chica	1	Unidad	\$	6.000,00	\$ 6.000,00
Mantenimiento	1	Unidad	\$	1.400,00	\$ 1.400,00
<b>(+)Subtotal Gastos Administrativos</b>				<b>\$</b>	<b>23.720,00</b>
<b>Total de Costos Indirectos</b>				<b>\$</b>	<b>42.980,00</b>

## **ANEXO F**

Flujo de caja





## BIBLIOGRAFÍA

1. Amparo Villacís, D. V. (2011). *Determinación de los sitios de inspección mediante elementos finitos, elaboración de la inspección con ensayos no destructivos y determinación del procedimiento para la certificación de los silos de la empresa BJ Services Ecuador*. Quito.
2. Asociación Española de la Industria Eléctrica. (s.f.). *UNESA*. Obtenido de <http://www.unesa.es/>
3. Betancur, J. G. (2006). Caracterización de una turbina del tipo Francis utilizada por una empresa local de generación de energía. *Caracterización de una turbina del tipo Francis utilizada por una empresa local de generación de energía*. Medellín, Colombia.
4. Castro, A. (Octubre de 2006). *Minicentrales hidroeléctricas*. Obtenido de <http://www.energiasrenovables.ciemat.es>
5. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (s.f.). *ROP digital*. Obtenido de Corrosión en las turbinas: [http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1925/1925\\_tomol\\_2440\\_04.pdf](http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1925/1925_tomol_2440_04.pdf)
6. Consejo Nacional de Electricidad. (2012).
7. Eduardo Briceño, R. E. (2008). *Manual de capacitación y mantenimiento de pequeñas centrales hidráulicas*. Lima.
8. Inza, J. (s.f.). *INZA*. Obtenido de <http://www.inza.com/ainoa/nuclear2.swf>
9. LLOG. (s.f.). *llogsa*. Obtenido de [http://www.llogsa.com/Descargas/Ultratips/Ediciones/Utipsed\\_166.php](http://www.llogsa.com/Descargas/Ultratips/Ediciones/Utipsed_166.php)
10. López, V., & Ramírez, W. (2011). Diseño de un Horno para Tratamiento Térmico del rodete de la turbina Francis (CELEC Unidad de Negocio Hidroagoyán). Riobamba, Chimborazo, Ecuador.
11. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2013). *El nuevo Sector Eléctrico Ecuatoriano*. Ecuador.

12. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2013). *Informe de rendición de cuentas*. Ecuador.
13. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (s.f.). *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*. Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/>
14. Pasilla, I. E. (1999). *Aplicaciones de los Acero Inoxidables*. Obtenido de [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v02\\_n3/aplicaciones.htm](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v02_n3/aplicaciones.htm)
15. Pedro Ayuso, J.-M. d. (s.f.). Detección de cavitación en turbina Francis. *Detección de cavitación en turbina Francis*. Cataluña, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
16. Piqueras, V. Y. (24 de Junio de 2014). *Universidad Politécnica de Valencia*. Obtenido de Turbina Francis: <http://victoryepes.blogs.upv.es/2014/06/24/turbina-francis/>
17. Programas y Actividades de Educación Ambiental. (s.f.). *Programas y Actividades de Educación Ambiental*. Obtenido de <http://comunidad.eduambiental.org>
18. Renedo, C. (s.f.). *Turbinas Hidráulicas*. Obtenido de <http://personales.unican.es/renedoc/Trasparencias%20WEB/Trasp%20Sist%20Ener/03%20T%20HIDRAULICAS.pdf>
19. S.A, H. (s.f.). *Montajes hidráulicos e industriales*. Obtenido de <http://hidromont.es/c-h-aguilar-palencia/>
20. Sistendca. (s.f.). Introducción a los Ensayos no destructivos.
21. Tersainox. (Mayo de 2011). *Tersaber*. Obtenido de Acero Inoxidable: [http://www.tersainox.com/images/tersaber/pdf/Tersaber\\_55\\_Esp.pdf](http://www.tersainox.com/images/tersaber/pdf/Tersaber_55_Esp.pdf)

