

# Universidad Nacional de Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



## “ Recuperación Integral de Rodetes Pelton del “Complejo Hidroeléctrico del Mantaro”

**T E S I S**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**ALVARO BELISARIO MEJIA TAMARIZ**

PROMOCION: 1980 - 2

**LIMA • PERU • 1990**

## RESUMEN

El presente trabajo, se refiere al estudio de la tecnología que se aplica en la recuperación integral de los rodets de las Turbinas Pelton, que tiene por objeto recuperar los perfiles hidráulicos desgastados de los álabes, a fin de garantizar una mayor durabilidad y confiabilidad en la operación de los Grupos Generadores del Complejo Hidroeléctrico del Mantaro de la Empresa ELECTROPERU S.A.

La referida tecnología desarrollada por los fabricantes y diseñadores de Rodetes, se aplica con singular éxito en el Taller de reparaciones de Campo Armiño-Huancavelica, lo cual conlleva una serie de Ventajas técnico-económicas.

Entre los procesos principales de esta tecnología, están, la soldadura, controles no destructivos y tratamiento térmico entre otros.

En el Plan de Mantenimiento integral de las Turbinas, se hace énfasis a los controles de los desgastes de los rodets e inyectoras, que son los componentes principales de una Turbina Pelton, equipo indispensable para asegurar la generación de la energía eléctrica de estas dos Centrales Hidroeléctricas, que constituyen el principal soporte energético del Sistema Eléctrico Interconectado Centro-Norte, cuya producción cubre el 55% de la energía hidroeléctrica a nivel nacional.

## I N D I C E

CAPITULO I : INTRODUCCION	1
CAPITULO II : CARACTERISTICAS DE LAS CENTRALES HIDROELECTRICAS	4
2.1 Ubicación y Antecedentes del Proyecto	4
2.2 Descripción Técnica de las Instalaciones	6
2.2.1 Central Hidroeléctrica del Mantaro	6
2.2.2 Central Hidroeléctrica Restitución	13
CAPITULO III : UTILIZACION DE LOS RODETES PELTON DE LAS CENTRALES MANTARO Y RESTITUCION	15
3.1 Aspectos Teóricos de la Turbina Pelton	15
3.2 Criterios de Operación de los Rodetes	21
3.2.1 Criterios Fundamentales de Utilización	21
3.2.2 Defectos que se presentan en los Rodetes Pelton	21
3.2.3 Controles en un Rodete	24
3.2.4 Datos Generales de Utilización	24
3.3 Consideraciones técnicas sobre la vida útil de los Rodetes	29
3.3.1 Aspectos Teóricos	29
3.3.2 Programa de Utilización de los Rodetes	33
CAPITULO IV : TECNOLOGIA DE LAS REPARACIONES	36
4.1 Tipo de Reparaciones	36
4.2 Especificaciones Técnicas de los Aceros de Fa- bricación	39
4.2.1 Características del Material de las Tur- binas	43

---

	Pág.
4.3 Reparaciones Parciales	46
4.3.1 Soldabilidad del Acero Fundido al Cromo- Níquel 13/4	47
4.3.2 Procedimientos	53
4.3.3 Tipos de Reparaciones Parciales	58
4.4 Recuperación Integral	61
4.4.1 Antecedentes de la Reparación Integral Rodetes Central Mantaro	61
4.4.2 Infraestructura del Taller	63
4.4.3 Actividades para la Reparación	65
4.4.4 Síntesis de la Reparación Integral del Rodete Pelton Nº 9 Central Mantaro	84
4.5 Tratamientos Térmicos	92
4.5.1 Aspectos del Tratamiento Térmico sobre las Propiedades Mecánicas de un Depósito de Soldadura	93
4.5.2 Tratamiento Térmico en el Horno de Campo Armiño	95
4.6 Ensayos No Destructivos	99
4.6.1 Líquidos Penetrantes	100
4.6.2 Partículas Magnéticas	108
4.7 Ventajas Económicas	113
4.7.1 Costos de Reparación del Rodete Pelton Nº 9 - Central Mantaro	114
4.7.2 Costo de Rodete Pelton Nuevo	118
4.7.3 Análisis del Cálculo de Costos	118
 CAPITULO V : PLAN DE MANTENIMIENTO INTEGRAL DE LAS TURBINAS	 120
5.1 Objetivo	120
5.2 Modalidad de las Intervenciones	120
5.2.1 Mantenimiento de Rodetes Pelton	121
5.2.2 Control de las Ruedas en Servicio	123
5.2.3 Mantenimiento de Inyectores	125

	Pág.
5.2.4 Principales Actividades del Mantenimiento Preventivo	128
5.2.5 Mantenimiento General o Over Haul	130
CONCLUSIONES	133
BIBLIOGRAFIA	135

ANEXOS :

- 1 Ubicación Geográfica Complejo Hidroeléctrico del Mantaro
- 2-1 Disposición General : C.H. Santiago Antunez de Mayolo  
C.H. Restitución
- 2-2 Perfil Longitudinal - Central Hidroeléctrico Restitución
- 3-1 Lista de Materiales de Acero Fundido
- 3-2 Especificación Electrodo Revestidos de Acero Cromo-Níquel. Normas AWS.
- 4 Especificaciones Técnicas Electrodo Citochrom 134.
- 5 Ensayos No Destructivos-Reparación Rodete Nº9 C. Mantaro.
- 6 Registro curva tratamiento Térmico Rodete Nº9 C. Mantaro.
- 7-1 Control Dimensional Rodete Nº 9 C. Mantaro - antes de R. Integral
- 7-2 Control Dimensional Rodete Nº 9 C. Mantaro - al final de R. Integral
- 8-1 Especificaciones Técnicas Control por Líquidos Penetrantes.
- 8-2 Especificaciones Técnicas Control por Partículas Magnéticas.

PLANO:

- 1 Cuadro de Utilización-Rodetes Pelton Complejo Mantaro.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

La generación de energía eléctrica, aprovechando los recursos hidráulicos que se encuentran en nuestra geografía andina, viene siendo desarrollada desde hace más de 40 años con la realización formulada por el Ing. Santiago Antúñez de Mayolo.

En virtud a la distribución geográfica de la Cordillera de los Andes en el Perú, se ha realizado el Proyecto del Complejo Hidroeléctrico del Mantaro, que ha dado origen a la Central "SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO", más conocida como "Central Mantaro" y a la "Central Restitución", las que en la actualidad resultan ser las de mayor potencia instalada en el país.

Por la disponibilidad de altas caídas de agua, las Centrales Eléctricas de mayor potencia en el país emplean Turbinas Pelton, por lo que el estudio del comportamiento de estas Turbinas adquiere importancia relevante.

El presente trabajo, denominado "RECUPERACION INTEGRAL DE RODETES PELTON DEL COMPLEJO HIDROELECTRICO DEL MANTARO", tiene por objeto resaltar la tecnología aplicada y las ventajas técnico-económicas del proceso de recuperación integral de Rodetes Pelton, que se realizan en el Taller del Complejo Hidroeléctrico, ubicado en el Campamento Campo - Armiño, Tayacaja -departamento de Huancavelica.

En el Capítulo II, se describe las características técnicas de las instalaciones electromecánicas de las Centrales Eléctricas, así como características del aprovechamiento hidráulico.

En el Capítulo III, se refiere a los criterios de operación de las Turbinas, que se siguen para establecer el programa de Utilización y Reparación de los Rodetes Pelton de las Centrales Mantaro y Restitución. También se señalan las consideraciones técnicas para poder estimar el tiempo de vida útil de dichos equipos.

En el Capítulo IV, se refiere a la tecnología desarrollada para ejecutar la reparación integral de los rodetes señalando las actividades principales, en las que destacan la soldabilidad, ensayos no destructivos y tratamientos térmicos.

En el Capítulo V, finalmente, trata del Plan de Mantenimiento Integral de las Turbinas, lo cual básicamente se divide en trabajos de mantenimiento preventivo y de mantenimiento general de los rodetes Pelton y de los Inyectores.

Cabe señalar, que uno de los propósitos que se persigue con el presente trabajo, es que la tecnología que se desarrolla en el Taller de Reparaciones del Complejo Mantaro, sirva como referencia para la realización del mantenimiento de las Turbinas Pelton de las otras Centrales Hidroeléctricas, relativamente nuevas en nuestro país, tales como la de Machu Picchu -Segunda Etapa, Charcani V y próximamente la Central de Carhuaquero. De esta forma se contribuye al desarrollo de una tecnología propia en nuestro país.

Expreso mi reconocimiento al personal técnico del Servicio de Mantenimiento Mecánico del Complejo Mantaro, con quienes llevamos adelante los trabajos de reparación de los Rodetes Pelton del principal centro de producción de energía eléctrica del Perú.

Agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería, en la persona de los señores docentes, por su contribución en mi formación profesional. En forma especial a los Ings. Ulises Huamán L. y Rolando Portugal P. por su asesoramiento para el desarrollo del presente trabajo.



## CARACTERÍSTICAS DE LAS CENTRALES HIDROELECTRICAS

### 2.1 UBICACION Y ANTECEDENTES DEL PROYECTO

---

a : ELECTROWATT-ENGINEERING SERVICE L.T.D. de Zurich y SOCIETE' GENERALE pour L'INDUSTRIE S.G.I. de Ginebra - Suiza. Ambos hicieron un análisis comparativo del Proyecto.

Considerando las Obras Civiles y los Equipos Electromecánicos, se optó por la mayor experiencia en la construcción de túneles para proyectos hidroeléctricos por parte del Grupo GIE-IMPREGILO en lugar de los contratistas del CONSORCIO ANGLO-ALEMAN. En cuanto a las instalaciones electromecánicas, entre los fabricantes de Turbinas, la firma RIVA CALZONI dispone de mayor experiencia en la fabricación de Turbinas de tipo Pelton de alta caída que la firma ENGLISH ELECTRIC del CONSORCIO ANGLO-ALEMAN. Además, en cuanto al financiamiento de la Obra, la propuesta italiana representaba un menor egreso para el estado.

En consideración a cuanto mencionado, el 1º de Setiembre de 1966 se celebró el Contrato con el Grupo GIE-IMPREGILO para la ejecución de las Obras, que entre las principales serían :

- TUNEL DE ADUCCION : Túnel a presión totalmente revestido
- CASA DE MAQUINAS : En el paraje Huaychán (hoy Campo Armiño) - Colcabamba, equipada con 03 Grupos de 114,000 kilovatios de potencia instalada cada uno.

En efecto, en Mayo de 1973 se inauguró la Primera Etapa de la Central Mantaro, con la Puesta en Servicio del primero de los

3 Grupos. En Noviembre de 1979 se culminó con la ampliación de la Segunda Etapa, con la Puesta en Servicio de la cuarta unidad de un total de 4 Grupos. Con ello, hasta entonces quedó concluida la Central Mantaro, equipada con 7 unidades de 114,000 kilovatios cada uno.

En Noviembre del año 1984 se inauguró el Primer Grupo de la Central "Restitución", conformada por 3 unidades iguales, de 72,300 kilovatios cada uno. De esta manera quedaron concluidas las instalaciones del Complejo Hidroeléctrico Mantaro I, con un total de 1'015,000 kilovatios instalados.

## 2.2 DESCRIPCION TECNICA DE LAS INSTALACIONES

En esta sección se hará una descripción de las obras del aprovechamiento hidráulico y las características de los equipos electromecánicos para las Centrales "Mantaro" y "Restitución".

### 2.2.1 Central Hidroeléctrica del Mantaro

#### a) Características del Aprovechamiento Hidráulico.

El Río Mantaro nace en el Lago de Junín, a una altitud de 4,080 m.s.n.m., recorre un total de 735 km. hasta su confluencia con el Río Apurímac para formar el Río Ene de la cuenca atlántica.

En el recorrido del río desde su nacimiento, a 340

Km., se tiene el Embalse de Tablachaca para la captación de las aguas para la Central Santiago Antúnez de Mayolo.

La estructura principal del embalse es una presa tipo Arco Gravedad de 77 m. de alto; consta de 4 vertederos de 15 x 7 m. construídos en la parte superior y 4 alivios de medio fondo (3 de 4 x 5.60 m. y 1 de 4 x 2.50 m.) cuya función es eliminar los sedimentos depositados.

La presa tiene un embalse de regulación de 7 millones de  $m^3$  a la cota máxima del embalse de 2,695 m.s.n.m.

#### Túnel de Aducción a Presión

Tiene una longitud de 19,813 m. de longitud y 4.80 m. de  $\emptyset$ i, con pozo piezométrico de doble cámara de expansión al final.

El túnel está dimensionado para transportar un caudal nominal de  $96 m^3/s$ . La pendiente es de 5‰.

#### b) Instalaciones Electromecánicas

Comprende el conjunto de Tubería Forzada y las instalaciones ubicadas en la Casa de Máquinas, construcción realizada a cielo abierto.

### Tubería Forzada

Al extremo final del túnel se inicia el conjunto de tres tuberías forzadas, que van paralelas a cielo abierto, con una longitud promedio de 1,540 m.

La tubería es de tipo soldado, construido en acero tipo 58/40 - 95/80.

Los diámetros interiores de las dos primeras tuberías varían entre 3,200 mm. a la entrada y 1,450 mm. a la salida del distribuidor de las Turbinas.

El espesor de las planchas varía entre 15 mm. y 48 mm.

Para la tercera tuberías, los diámetros interiores varían entre 3300 mm. y 2800 mm. a la entrada y salida respectivamente. El espesor de la plancha va ría entre 15 mm. y 54 mm.

En el tramo inicial de cada tubería se ubica una válvula mariposa de doble sellado con mando electro-mecánico e hidráulico respectivamente.

Las dos primeras tuberías se construyeron en las obras de la Primera Etapa y cada una alimenta a 2 Grupos. La tercera tubería, construida durante la Segunda Etapa alimenta 3 Grupos.

### Turbina Hidráulica

Los siete Grupos Alternadores de la Central están equipados con Turbinas Pelton de eje vertical, acoplada directamente al Generador y tienen las siguientes características :

- Tipo : PV4 (Pelton Vertical)
- Salto neto variable entre : 780 y 850 m.
- Salto útil : 820 m.
- No. de Inyectores : 04
- Caudal nominal : 16.48 m<sup>3</sup>/s.
- Potencia nominal : 117 MW
- Velocidad nominal : 450 rpm
- Velocidad de fuga : 810 rpm
- P. D<sup>2</sup> : 1,850 t.m<sup>2</sup>
- Suministrador : RIVA CALZONI

La Turbina está provista de válvula rotativa de intercepción con  $\varnothing$ i de 1,450 mm.

Las Turbinas están instaladas a una cota de 1,840 m.s.n.m. Ver anexo 2-1

### Reguladores de Velocidad

Las Turbinas tienen el sistema de Regulador de Velocidad de las siguientes características :

- Tipo : Electromagnético EM-58
- Ajuste grado estadístico : 5%
- Marca : RIVA CALZONI

Se observa que el ajuste del estatismo del 5% en el Regulador, es una característica de operación de los Grupos como Central Base.

#### Generador

El Generador, suministrado por la firma ANSALDO de Italia, es de eje vertical, acoplado a la Turbina. Es del tipo cerrado, autoventilado y enfriado con agua.

- Tipo de Generador : ATBW
- Potencia nominal : 120,000 KVA.
- Estator
  - Tensión : 13,800 V.
  - Corriente : 5,022 A.
  - Frecuencia : 60 Hz.
  - Factor de potencia : 0.95
  - Peso : 133 Tn.
- Rotor
  - No. de polos : 16
  - Velocidad : 450 rpm.
  - Peso : 250 Tn.

El Sistema de Excitación de los Generadores de la I Etapa es a través del dínamo excitatriz rotante coaxial al Rotor.

Los Generadores de la II Etapa tienen el Sistema de Excitación estática a tiristores, suministro de la firma italiana MARELLI.

#### Transformadores de Potencia

- Potencia nominal : 40 MVA
- Tipo : Monofásicos (conectado en banco trifásico)
- Relación de transformación :  $13,800/220,000/\sqrt{3}$  V.
- Frecuencia : 60 Hz.
- Peso del aceite : 10.5 Tn.
- Suministro : MARELLI

#### Líneas de Transmisión

En la Sub-Estación de Campo Armiño (SECA) tienen origen seis líneas largas de 220 kV. con destino a la ciudad de Lima, en la Sub-Estación de San Juan de Miraflores, y su interconexión con la red de 220 kV. del Sistema Interconectado Centro-Norte (SICN) que actualmente llega hasta la ciudad de Chiclayo en la Costa.

Estas líneas están instaladas en estructuras a doble terna y son las siguientes :



- Línea Pomacocha I
- Línea Pomacocha II
- Línea Pisco I
- Línea Pisco II
- Línea Pachachaca I
- Línea Pachachaca II

Adicionalmente, adyacente al Patio de Llaves de SECA se tiene la Sub-Estación COBRIZA, que tiene un transformador de tres devanados de relación de transformación de 230/69/10 kV. para alimentar la línea de 69,000 V. que va hacia la mina de COBRIZA y luego a Ayacucho.

Las características principales de la Línea de 220 kV. son las siguientes :

- Material : AL-AC (CURLEY)
- Tensión : 220,000 V.
- Cable conductor :  $\emptyset$  31.68 mm.
- Sección aluminio : 523.7 mm<sup>2</sup>
- Sección acero : 67.9 mm<sup>2</sup>
- Resistencia eléctrica a 20°C : 0.05527 Ohm/km.

## 2.2.2 Central Hidroeléctrica Restitución

### a) Características del Aprovechamiento Hidráulico.

#### Captación

Las aguas turbinadas por la Central "Santiago Antúnez de Mayolo" depositadas en el Canal de Descarga, son captadas a través de un Puente Tubo de 5 m. de  $\emptyset$  y 93 m. de longitud, a una cota de 1827.98 m.s.n.m. Ver anexo 2-2

#### Túnel a Pelo Libre

A continuación del Puente Tubo, el agua ingresa a un Túnel a Pelo Libre de 789.62 m. de longitud y  $\emptyset$  promedio de 5.40 m.

El túnel tiene una pendiente de 2.1% y arriba a un Vertedero-Pulmón de Regulación para ingresar finalmente al Pozo Blindado o Tubería Forzada en sus tramos vertical y horizontal respectivamente.

Al inicio del túnel se ubica un pozo de aireación de 1.50 m. de  $\emptyset$ .

### b) Instalaciones Electromecánicas

Comprende el Conducto Forzado y los equipos de la Casa de Máquinas; el edificio está construido en caverna.

### Conducto Forzado

Tiene un  $\emptyset$ i de 4.50 m., el tramo vertical es de 240.15 m., un tramo horizontal de 153.28 m. y  $\emptyset$  final de 2.5 m.

El espesor de las planchas varía entre 13 mm. al inicio del tramo vertical y 18 mm. al extremo de los distribuidores para las tres turbinas. El material es acero IDROTUB-42F.

### Turbina Hidráulica

Las Turbinas de la Central Restitución han sido suministradas por la firma HYDROART, que agrupa a las empresas italianas ANSALDO, RIVA CALZONI y FRANCO TOSI.

Cada una de estas empresas suministraron una turbina respectivamente.

Las turbinas son de eje vertical acopladas directamente al Generador y tienen las siguientes características :

- Tipo	: PV.6
- Potencia nominal	: 72,500 kW.
- Salto neto variable	: Entre 257 y 247 m.
- Salto nominal	: 253 m.
- Caudal	: 32 m <sup>3</sup> /s.
- Velocidad nominal	: 200 rpm.
- Velocidad de fuga	: 345 rpm.
- No. de inyectores	: 06

### Regulador de Velocidad

Las turbinas tienen el sistema de Regulador de Velocidad Electrohidráulico tipo RE-100/A/PR, suministrado por RIVA CALZONI. El grado de ajuste del estatismo es del 5%, similar a los Grupos de la Central Mantaro.

### Generador

Suministro de la firma ANSALDO, es de eje vertical, de tipo cerrado, autoventilado en ciclo cerrado, con enfriamiento de agua.

Las características principales son :

- Tipo de Generador	: ATBW-36
- Potencia nominal	: 82,500 KVA.
- Estator	
Tension	: 13,800 V.
Corriente	: 3,452 Amp.
Frecuencia	: 60 Hz.
Factor de potencia	: 0.85
Peso	: 108 Tn.
- Rotor	
No. de polos	: 36
Velocidad	: 200 rpm.
Peso	: 201 Tn.
- Momento de inercia de masas rotantes ( $PD^2$ )	: 5,000 $Tm^2$

Transformadores de Potencia

- Potencia nominal : 27.5 MVA
- Tipo : Monofásicos
- Relación de transformación : 13,800/220,000/ $\sqrt{3}$  V.
- Frecuencia : 60 Hz.
- Peso del aceite : 6.5 Tn
- Suministro : INDUSTRIA ELECTRICA  
DI LEGNANO (I.E.L)  
Italia.

Otros Equipos de Alta Tensión

Comprende el Patio de Salida para las tres Líneas de 220 kV. entre Restitución y SECA.

## CAPITULO III

### UTILIZACION DE LOS RODETES PELTON DE LAS CENTRALES MANTARO Y RESTITUCION

#### 3.1 ASPECTOS TEORICOS DE LA TURBINA PELTON

Las turbinas hidráulicas son máquinas que transforman la energía del agua en energía mecánica del eje de la turbina.

Una Turbina Pelton está constituida principalmente por una rueda o disco de acero, con cierto número de paletas o álabes de forma especial a doble cuchara.

Un chorro de agua dirigido tangencialmente respecto a la rueda, golpea la arista media del álabe dividiéndose en dos partes que discurriendo sobre las dos superficies laterales ejerce un empuje sobre la paleta, determinando un momento de rotación respecto al eje de rueda y la pone en movimiento.

El estudio de la pala está relacionada con el borde de descarga sobre el cual se oculta el chorro proveniente de la arista central con inclinación variable.

---

Dicho estudio tiene por objeto que en cualquier punto el ángulo de salida ( $\beta_2$ ) sea tal que dé lugar a una mínima velocidad absoluta ( $C_2$ ).

Los datos constructivos de una turbina Pelton son :

- Diámetro del chorro  $D_0$ ; ello depende del caudal y su diámetro de tangencia  $D_1$ , del cual depende la velocidad del rodete.
- La caída  $H$ , que define la velocidad del chorro y en relación al cual se calcula la velocidad periférica del álabe sobre el diámetro  $D_1$ .
- La velocidad relativa  $W_1$  se irá reduciendo por efecto de la desviación y despreciando la pequeña pérdida de velocidad debido al escurrimiento sobre la superficie del álabe, el agua alcanza la misma velocidad relativa al otro extremo del álabe y lo abandona con una velocidad absoluta  $C_2$ . Se tiene entonces :  $W_2 = W_1$ .
- En un álabe, la arista central viene afilada por razones de resistencia, ello representa un ángulo de  $2\beta_1 = 20^\circ$ . En la figura No.1 se muestra una sección del álabe con los ángulos referidos.

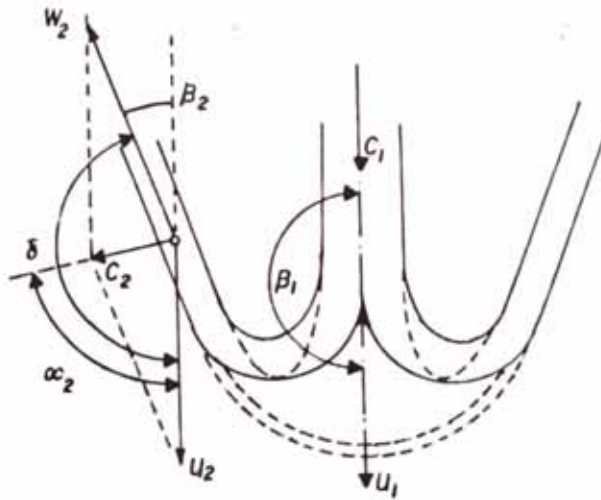


Fig. N° 1 Acción del chorro sobre el álabe Pelton

$\alpha$  = ángulo entre C y U

$\beta$  = ángulo entre W y sentido contrario de U

$C_1$  = velocidad absoluta del chorro de agua

$U_1$  = velocidad periférica del álabe al ingreso

$W_1$  = velocidad relativa de ingreso ( $W_1=C_1-U_1$ )

$C_2$  = velocidad absoluta de salida

$W_2$  = velocidad relativa de salida



La carga teórica o salto teórico de una turbina se calcula por la siguiente expresión, denominada ecuación principal de las turbinas hidráulicas :

$$H_t = \frac{C_1 U_1 \cos \alpha_1 - C_2 U_2 \cos \alpha_2}{g}$$

Considerando la ecuación anterior, la potencia teórica de la turbina resulta :

$$P_t = \frac{gQ \times C_1 U_1 \cos \alpha_1 - C_2 U_2 \cos \alpha_2}{g}$$

Las paletas en las turbinas se diseñan para que en las condiciones óptimas de funcionamiento se obtengan  $\alpha_2 = 90^\circ$ . Por lo tanto la potencia teórica de una turbina resulta :

$$P_t = gQ H_t$$

Donde :

$g$  = Aceleración de la gravedad :  $m/seg^2$

$Q$  = Caudal :  $m^3/seg$

$H_t$  = Altura: metros

$P_t$  = Potencia : Kilovatios

El otro elemento importante de una Turbina Pelton es el inyector o conjunto introductor compuesto por una tobera fija, un elemento móvil denominada punta de aguja, y el deflector o desviador de chorros. En el Inyector, se forma el chorro de agua que impulsa al rodete.

## 3.2 CRITERIOS DE OPERACION DE LOS RODETES

### 3.2.1 Criterios Fundamentales de Utilización

El criterio principal de utilización de un Rodete Pelton, está relacionado con el nivel de desgaste que presentan las superficies activas de las cucharas y el estado de conservación de las mismas.

El agua utilizada en una instalación hidroeléctrica, arrastra en suspensión partículas sólidas constituidas por arena, limo, cristales de silicio, etc., según la constitución geológica de la cuenca del río.

Los rodetes en funcionamiento tienen un determinado período de operación, limitado por el grado de desgaste que se presenta en las cucharas.

### 3.2.2 Defectos que se presentan en los Rodetes Pelton.

Durante el proceso de operación de los Rodetes Pelton, se presentan tres tipos de defectos principales :

- Erosión : Depende de la concentración de sólidos que contiene el agua turbinada, tamaño, forma y composición mineralógica de los gránulos, así como de las condiciones hidráulicas, tal como la velocidad del chorro de agua.

El desgaste por erosión, normalmente se distribuye equitativamente dentro de las cucharas de un rodete. Luego de pequeños deterioros de la superficie por la erosión, se inicia la cavitación por la presencia de vórtices locales.

- Hoyos o Cavidades : Producidos por la existencia de discontinuidades superficiales o irregularidad del chorro. La formación de hoyos o cavidades, produce una superficie áspera y se presenta en las tres zonas del álabe : arista central, parte posterior del filo de ataque y copa del álabe.

Las cavidades débiles se desarrollan en la parte posterior de la cuchara y arista central.

El desgaste de las boquillas y de las agujas de los inyectores puede crear también disturbios y expansión de los chorros, que influyen para la formación de cavidades. En la figura No.2, se muestran esquemas de desgaste debido a dichos fenómenos.

- Grietas o Fisuras : Se originan por defectos del metal fundido que se localizan ligeramente debajo de la superficie y que en el tiempo pueden propagarse hacia la superficie, debido a los esfuerzos alternados a que es sometido el álabe. Esto cuando el rodete aún no se ha reparado con soldadura.

Las fisuras también pueden originarse por defectos de soldadura, tales como porosidades y socavaciones durante el proceso de reparación del rodete.

Las grietas normalmente se presentan en las siguientes zonas :

- filos de ataque del álabe,
- en la raíz del álabe (fondo de la hendidura) adyacente al disco del rodete.

Cuando se tiene fuerte desgaste erosivo en los filos de ataque del álabe, también se originan fisuras. Las fisuras en la raíz del álabe son las más peligrosas y deben ser detectadas a tiempo, ya que pueden presentar una profundidad crítica comprometiendo la integridad del álabe.

### 3.2.3 Controles en un rodete

En los Rodetes Pelton de la Central Mantaro, el grado de desgaste es medido por la profundidad y la dimensión superficial de los hoyos en las copas de los álabes. El avance del desgaste se controla periódicamente. Estos controles definen la fecha de cambio del rodete y fijan criterios para una Reparación Parcial e Integral.

### 3.2.4 Datos Generales de Utilización

### 3.2.4.1 Rodetes de la Central Mantaro

Ver Cuadro de Utilización de Rodetes (Plano 01).

#### PRIMERA ETAPA

Desde el año 1973 hasta el año 1979, la Central operó con tres Grupos y 05 rodetes. Durante este período de operación, el caudal turbinado total fue de 12 a 45 m<sup>3</sup>/s con un tiempo promedio de operación por rodete de 7100 horas. La concentración de sólidos en época de estiaje es de 0.0973 gr/lt, en la época de avenidas es de 0.2848 gr/lt y después de las lluvias es de 0.0242 gr/lt.

Estos parámetros permitieron en algunos casos utilizar las ruedas hasta en dos períodos consecutivos de lluvias, que se presentan en los meses de Enero a Marzo. Este período se considera de baja concentración de sólidos. La represa operó en este período como un gran reservorio de sedimentación, reduciendo su volumen útil de almacenamiento.

#### SEGUNDA ETAPA

De 1980 a 1981 se suministran 06 rodetes nuevos con la ampliación de la Central, contando entonces con 11 rodetes y 07 Grupos Generadores. En 1982, 1984 y 1986, se adquieren sucesivamente (1, 2 y 2) 05 rodetes adicionales.

Con la puesta en servicio de la II Etapa y el incremento de la demanda de energía del sistema, la Central ingresa a una nueva etapa de operación, incrementándose el caudal

turbinado de 50 a 85 m<sup>3</sup>/s, la concentración de sólidos también aumenta en el período de avenidas; durante el estiaje esta es de 0.0776 gr/lt y durante las avenidas es de 0.6895 gr/lt.

En esta nueva condición de operación, los rodets tienen un período de trabajo de 5,400 horas.

Al inicio de esta etapa, las ruedas 1 y 2 culminan su primer ciclo de operación y entre 1980 y 1983 los rodets operaron con períodos de hasta 13,000 horas, originando desgastes prematuros en 06 rodets; la adquisición de nuevos rodets permitió la operación regular de la Central.

Del análisis de datos del Cuadro de Utilización, se obtiene un valor promedio de 23,419 horas para llegar a una reparación integral; este valor coincide con el valor estimado de 23,000 horas fijado en los criterios de durabilidad de los rodets.

#### 3.2.4.2 Resumen de los Datos de Operación

Ver Cuadro No.01.

Las horas de funcionamiento total, por rodete, han sido consideradas hasta la fecha del último período de operación durante el primer trimestre de 1989. Se indica también el número de períodos de operación, el número de reparaciones integrales, los valores promedio de horas de operación, hasta la primera reparación integral.

CUADRO No. 1

RESUMEN DE DATOS OPERATIVOS DE LOS RODETES DE LA CENTRAL MANTARO  
EVALUADOS HASTA ABRIL 1989

Rodete No.	Fecha Inicio Operación	Horas de Operación	No. Período	No. R.l.	Horas/ Período	Horas/ tra. R.l.	Fecha período considerado	Potencia media de operación Mw.	Lugar R. i.	Energía producida MWh	Observaciones
1	30.04.73	45,888	8	1	5,736	29,832	MARZO '89	69.81	SUIZA	3'203,360.68	
2	08.09.73	47,239	9	1	5,249	28,053	ENERO '89	72.79	SUIZA	3'438,646.78	
3	13.01.74	59,882	9	1	6,654	41,883	ENERO '89	74.32	SUIZA	3'450,789.74	
4	01.05.74	46,098	8	1	5,762	32,903	ABRIL '89	74.62	SUIZA	3'440,095.84	
5	10.04.78	41,593	7	1	5,942	24,498	MARZO '89	70.75	SUIZA	3'261,474.04	
6	01.03.79	21,800	4	1	5,450	20,340	AGOSTO '88	71.26	MANTARO	1'553,430.92	
7	01.09.79	30,303	7	1	5,051	21,494	ABRIL '89	74.70	LIMA/ MANTARO	2'263,726.10	
8	06.01.80	24,326	5	1	4,865	18,321	JUNIO '88	78.16	SUIZA	1'901,330.00	
9	20.01.80	31,319	4	1	7,830	31,319	MARZO '87	75.56	MANTARO		
10	01.07.80	31,698	5	1	6,340	17,193	MARZO '89	66.85	SUIZA	2'119,266.00	
11	11.03.81	19,613	3	1	6,629	19,889	MAYO '86	78.31	MANTARO	1'536,007.68	EN PROCESO
12	17.05.82	23,961	4	1	5,990	23,961	ABRIL '86	77.76	MANTARO	1'863,278.98	R. i. EN PROCESO
13	29.03.84	11,957	3	1	3,986	11,957	ABRIL '86	79.59	MANTARO	951,641.88	R. i. EN PROCESO
14	06.04.84	25,858	5	-	5,172	-	NOVIEM. '88	81.66	-	2'111,651.48	R. i.
15	30.07.86	9,975	2	-	4,987	-	MAYO '88	82.44	-	822,324.52	R. i.
16	08.07.87	9,368	2	-	4,684	-	OCTUBRE '88	83.74	-	784,467.58	R. i.
		480,878			5,645	23,419		75.77			

El promedio general de las horas de operación de los 16 rodetes es de 5,645. Este dato general coincide con el valor a que actualmente se llega; durante los primeros años de operación alcanzaron períodos mayores a las 10,000 horas, por el bajo caudal y baja concentración de sólidos.

La concentración de sólidos tiene una relación directa con el desgaste, pero es variable de año en año, por ello, el único parámetro que define el cambio del rodete es el desgaste superficial de la cucharas. Además, se han tenido períodos de duración variable en toda la etapa, desde 3,300 a 13,000 horas.

#### 3.2.4.3 Rodetes de la Central Restitución

Ver Cuadro de Utilización de Rodetes (Plano 01)

Los tres Grupos Generadores de la Central Hidroeléctrica de Restitución, iniciaron su operación entre 1984 y 1985, para lo cual se suministraron 05 Rodetes Pelton, de los cuales 03 están en servicio hasta la fecha en su primer período de uso, y se tienen 02 rodetes nuevos disponibles como reserva.

Según controles recientes, la concentración de sólidos en el agua turbinada tiene el valor promedio en época de avenidas de 0.2043 gr/lt y de 0.1214 en época de estiaje. Dichos valores sumados a la condición hidráulica



de bajo salto y baja velocidad de los Grupos, permiten una duración por períodos de trabajo de un rodete que supera las 20,000 horas.

Los 03 rodetes instalados en los Grupos, hasta la fecha presentan los siguientes valores promedio de desgaste de los álabes :

- Desgaste promedio copa álabes : 2.5 mm.
- Desgaste promedio arista central álabes : 2.8 mm.

Cabe señalar que en los rodetes en servicio, en los años 1986 y 1987, han cumplido 14,000 horas de operación; se realizó en sitio esmerilado parcial de la superficies rugosas de los álabes .

De los Datos Estadísticos de Operación, según cuadro Nº 02, los tres Grupos han trabajado hasta la fecha con el 80 % de su potencia nominal.

### 3.3 CONSIDERACIONES TÉCNICAS SOBRE LA VIDA ÚTIL DE LOS RODETES

#### 3.3.1 Aspectos Teóricos

La vida útil de un rodete está relacionada principalmente con el comportamiento mecánico del límite de esfuerzo por fatiga del acero fundido al cromo-níquel, del cual están constituidas dichas piezas y modernamente gran parte de la maquinaria hidráulica de las instalaciones de fuerza.



Como es de conocimiento, la tendencia actual en la fabricación de los rodetes, es utilizar el acero fundido inoxidable al Cr-Ni 13/4 por sus características de resistencia a la corrosión, abrasión y básicamente por su soldabilidad.

Hasta hace aproximadamente dos décadas, se fabricaban Rodetes Pelton en acero fundido Cr-Ni 13/1. Así por ejemplo, en nuestro país la Central Hidroeléctrica YAUPI de Centro Min-Perú dispone de este tipo de equipos.

A fin de estudiar la durabilidad de un Rodete Pelton, los constructores de turbinas han efectuado pruebas de fatiga en laboratorios, aplicando cargas cíclicas a probetas de metal fundido, simulando las condiciones operativas de un álabe. Estos experimentos se han realizado, por ejemplo, en los laboratorios de la casa fundidora GEORG FISCHER de Suiza.

De los resultados obtenidos, se ha llegado a estimar que el número de ciclos reversibles aplicable a un Rodete Pelton está en el orden de  $10^9$  a  $10^{11}$  ciclos, estableciendo como valor promedio probable la siguiente expresión, según la Curva de Wholer :

$$N^{\circ} \text{ de impactos} = 2 \times 10^{10} \text{ (valor límite)}$$

Donde :

$$N^{\circ} \text{ impactos} = N^{\circ} \text{ inyectores} \times \text{rpm} \times 60 \times \text{horas trabajo}$$

- 1er. caso - Rodetes de la Central Mantaro

Nº inyectores : 4

rpm : 450

De la expresión resulta :

$$\text{Horas de trabajo} = 185,185 \text{ horas}$$

Es decir, la vida útil teórica de un Rodete Pelton de la Central Mantaro sería de 185,185 horas de funcionamiento.

Considerando el valor límite obtenido, es necesario aplicar un factor de seguridad, por consideraciones metalúrgicas de fabricación y criterios de operación para establecer un valor mínimo promedio de vida del rodete.

Si consideramos el efecto de la presencia de fisuras en los primeros periodos de operación de los rodetes, suministrados en la II Etapa y elegimos un factor de seguridad 2, se obtiene un promedio de 92,000 horas de funcionamiento total que implica 04 ciclos de vida parcial de 23,000 horas cada uno, y se efectuarían 03 reparaciones integrales como mínimo.

- 2do. caso - Rodetes de la Central Restitución

Nº inyectores :

rpm : 200

De la expresión resulta :

$$\text{Horas de trabajo} = 277,777 \text{ horas}$$

De acuerdo al buen comportamiento metalúrgico de los rodets de esta Central, que ha permitido hasta la fecha un mínimo desgaste sin la presencia de fisuras en más de 20,000 horas de funcionamiento, elegimos un factor de seguridad de 1.4, resultando por criterios de operación 198,000 horas de funcionamiento total que implica 03 ciclos de vida parcial de 66,000 horas cada uno y se efectuarían 02 reparaciones integrales.

### 3.3.2 PROGRAMA DE UTILIZACION DE LOS RODETES

#### a) Rodets de la Central Mantaro

Las horas de operación límite promedio, de 92,000, estimado en base al número de impactos permitidos experimentalmente, tiene un factor de seguridad 2. Para la proyección de los períodos de utilización de los rodets tenemos como ejemplo la rueda con mayor horas de operación, la Rueda N° 3 con 59,882 horas; a esta rueda le quedaría un tiempo útil de operación de sólo 32,118 para completar el límite establecido.

Para el cálculo de la fecha límite de uso, se toma en cuenta las horas de funcionamiento anual por el número

de máquinas de la Central, dividido por el número de ruedas disponible; en nuestro caso consideramos 15 unidades (para evitar casos fortuitos o se descuenta un rodete), así resulta :

$$6 \times 24 \times 365 / 15 = 3,504 \text{ horas por año/rueda}$$

Con este valor calculamos los años de operación antes de finalizar el ciclo de vida útil y resulta :

$$32,118 / 3,504 = 9 \text{ años para el rodete } 03 \text{ el cual tiene el mayor número de horas de operación.}$$

b) Rodetes de la Central Restitución

Para la proyección de los periodos de utilización de los rodetes, tomamos el valor límite promedio de 198,000 horas, establecido en base al número de impactos; considerando al rodete N° 2 con mayor horas de operación, un total de 21,891, a esta rueda le quedaría un tiempo útil de operación de 176,109 horas para completar el límite establecido.

Para calcular la fecha límite de uso, consideramos las 03 máquinas de la Central y los 04 rodetes disponibles (para evitar casos fortuitos descontamos 01 rodete), así resulta :

$$3 \times 24 \times 365/4 = 6,570 \text{ horas por año/rueda}$$

Con este valor calculamos los años de operación antes de finalizar el ciclo de vida útil y resulta :

$176,109/6,570 = 26$  años para el rodete 02, el cual tiene el mayor número de horas de operación hasta la fecha.

## CAPITULO IV

### TECNOLOGIA DE LAS REPARACIONES

La reparación de un rodete requiere utilizar técnicas que pueden variar según la importancia del defecto y también de acuerdo a los medios de que se dispone.

#### 4.1 TIPOS DE REPARACIONES

De manera general, las reparaciones pueden clasificarse en dos tipos : Parcial e Integral.

##### REPARACIONES PARCIALES

Se denominan así a las que se ejecutan como resultado de los desgastes que se presentan en las superficies activas de los álabes del rodete, en un periodo normal de operación.

Una Reparación Parcial consiste en recuperar los perfiles desgastados de un álabe para adaptarlos a un mejor aprovechamiento de la energía cinética del agua. Esto se logra con el relleno de las zonas desgastadas mediante soldadura y el respectivo pulido con abrasivos, hasta conseguir una superficie muy fina en las cucharas, con la finalidad de

---



ayudar a la descarga del chorro.

Para el caso de los rodetes de la Central Mantaro, en un período de operación de 4,500 horas en época de lluvia, se llega a un desgaste promedio de 4 mm. y en época de estiaje, con periodos de 6,000 horas de funcionamiento, se llega a un desgaste de 3 mm. Estos valores de desgaste se tienen en el perfil interior del centro de las copas de la cucharas, cuyo espesor original es de 46 mm.

Para los rodetes de la Central Restitución, por las características de bajo salto hidráulico y baja velocidad del rodete, las reparaciones parciales son de dos tipos :

1. Para un periodo de operación de 15,000 horas, se tiene un desgaste de 2.0 mm. en la copa del álabe respecto al espesor original de 61 mm.; por ello, es suficiente un pulido total con piedras de esmeril de grano mediano y fino.
2. A las 25,000 horas se estima llegar a un desgaste de 5 mm. en la superficie de la copa de los álabes, por lo que se ejecutará Reparación Parcial con soldadura en dichas zonas.

#### REPARACIONES ÍNTEGRALES

Cuando el nivel de desgaste acumulado en los álabes de un rodete, luego de varios periodos de funcionamiento, llega al

orden de 25 a 30% del espesor inicial, es necesario recuperar el perfil desgastado en todas las zonas erosionadas de la superficie del álabe hasta obtener los perfiles iniciales de diseño; vale decir como si el rodete fuera nuevo. Este proceso de reparación constituye una Recuperación Integral.

El nivel de desgaste considerado, como es notorio, afecta la robustez de la pala disminuyendo la resistencia del metal del rodete a los esfuerzos mecánicos durante la operación normal de la Turbina.

- Rodetes de la Central Mantaro

La reparación integral se ejecuta cuando los desgastes superan los 15 mm. medidos al interior de la copa de las cucharas de espesor original de 46 mm., y 12 mm. en los bordes laterales centrales de las cucharas, de espesor original de 34 mm.

- Rodetes de la Central Restitución

La reparación integral se realizará cuando el desgaste supere los 20 mm. medidos al interior de la copa de las cucharas, de espesor original de 61 mm. y 13 mm. en los bordes laterales centrales de las cucharas, de espesor original de 37 mm.

#### 4.2 ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LOS ACEROS DE FABRICACION

En la actualidad, y desde hace tres décadas, para la fabricación de Rodetes Pelton y otros componentes de Turbinas Hidráulicas se utiliza el acero fundido al 13% cromo.

Las ventajas de estos aceros, comparados con aceros al carbono son las siguientes :

- Mayor resistencia mecánica
- Mayor resistencia a la corrosión y cavitación
- Menores daños por erosión

Las investigaciones realizadas por los fabricantes sobre este clásico acero del 13% de cromo, se han hecho con la finalidad de estudiar los siguientes puntos :

- Disminución del contenido de carbón a fin de reducir la dureza después de la soldadura.
  - Incremento del contenido de níquel a fin de determinar una estructura puramente martensítica, libre de ferrita delta, redundando en una ventaja respecto a la corrosión y a la ductilidad.
  - Introducción de una pequeña cantidad de molibdeno para disminuir la tendencia a la fragilidad por temple.
  - Mejoramiento de la soldabilidad, como resultado de que los
-

componentes de la aleación bajan la temperatura del inicio de la martensita (punto Ms.).

- Mejoramiento de los valores de tenacidad.

#### COMPOSICION QUIMICA OPTIMA

En base a las consideraciones anteriores, se han definido los criterios para obtener una composición química óptima, siendo la siguiente :

**Carbono** : Por razones de soldabilidad y tratamiento térmico, el contenido de carbón se ha limitado como máximo a 0.06%.

**Cromo** : Es recomendable un bajo contenido de cromo, debido a que combinado al bajo porcentaje de carbono de la aleación, es suficiente para asegurar la resistencia a la corrosión.

**Molibdeno** : A fin de prevenir la fragilidad en el revenido y mejorar la resistencia a la corrosión, se limita su valor a 0.5%.

**Silicio** : Debido a la gran fuerza en la formación de ferrita y su efecto en detrimento de la ductilidad, se limita el contenido de silicio a 0.6%.

**Níquel** : El contenido de níquel está entre el límite inferior, que deberá ser tal como para obtener

una micro estructura libre de ferrita-delta, y un límite superior que debe dar una pequeña cantidad de austenita retenida, en lo posible. De acuerdo a las investigaciones, el contenido óptimo de níquel es del orden del 4%.

Los valores nominales de la composición química para el acero fundido de 13% Cr. son :

- Carbono : 0.04 a 0.06%
- Cromo : 12 a 13%
- Níquel : 3.5 a 3.9%
- Molibdeno : 0.5%

En la fabricación de Rodetes Pelton se venía utilizando el acero convencional de 13% Cr., 1% Ni., con un esfuerzo de tensión mínimo de 65 Kg/mm<sup>2</sup>. La tendencia actual, desde la década de 1,970, es la fabricación de piezas de acero al 13% Cr., 4% Ni., con valores mínimos del esfuerzo de tensión de 75 a 90 Kg/mm<sup>2</sup>.

En la Tabla N°1 se muestran los valores de la composición química, propiedades mecánicas y puntos de transformación para el acero al 13/4 de Cr/Ni.

En el Anexo 3-1; se incluye la lista de materiales de acero fundido del Fundior Georg, Fischer - Suiza.

TABLA 1. Características del Acero Fundido al Cr-Ni, 13/4.  
Datos tomados de la lista de materiales del Fundidor  
G. Fischer.

1. TIPO	ACERO FUNDIDO MARTENSITICO-FERRITICO	
DESIGNACION	DIN : G-X5 Cr. Ni. 134	
	ASTM : CA-6NM	
	AFNOR : Z6CND 1304-M	
MATERIAL	COR 134.75 (Grado G.Fischer)	
2. COMPOS. QUIMICA	C : $\leq 0.06\%$	
	Si : 0.3%	
	Mn : 0.6%	
	Cr : 12.5%	
	Ni : 3.7%	
	Mo : 0.5%	
3. PROPIED. MECANICAS	Límite fluencia	: 60 kg/mm <sup>2</sup>
	Resistenc. a la tensión	: 75 kg/mm <sup>2</sup>
	Elongación (A5)	: 15 %
	Tenacidad	: 55 Joules
	Dureza	: 255 HB
4. PUNTOS DE TRANSF.	AC1	: 660°C
	AC3	: 880°C
	Ms	: 260°C
	Mf	: 100°C
5. TRATAM. TERMICO	Austenización	: 1050 °C/aire
(tempering)	Revenido	: 590 - 620 °C/aire

---

---

---

---

---

- Fundidor : GEORG FISCHER (SUIZA)

Las dimensiones principales del rodete, se muestran en la Fig. 3.

b) Inyectores

- Boquillas y puntas de aguja : Se dispone de juegos de piezas de dos tipos fabricadas en acero inoxidable COR 134 y Stellite, respectivamente.

- Recubrimiento Stellite : 03 mm. de espesor

B) CENTRAL RESTITUCION

a) Rodete Pelton :

- Acero fundido inoxidable : COR 134  
- Diámetro externo : 4,190 mm.  
- Diámetro hidráulico : 3,190 mm.  
- Peso : 32 T.  
- Número de álabes : 20  
- Fundidor : GEORG FISCHER (SUIZA)

Composición química y propiedad mecánicas : Similares



a las de los rodets de la Central Mantaro, por tratarse del mismo tipo de acero.

b) Inyectores :

- Boquillas y cuerpo : Acero X 8 Cr-Ni 1910

- Puntas de aguja

Recubrimiento Stellite	}	- Revestimiento superficial (1ra. capa) stellite tipo 6 : aproximadamente 2 mm.
		- Restante (2da. capa) stellite tipo 1 : aprox. 4 mm.
		- Espesor acabado : 6 mm.

Stellite dureza superficial. : HRC  $\geq$  50.

#### 4.3 REPARACIONES PARCIALES

Para la realización de este proceso, respecto a la soldadura, es necesario principalmente, tomar en cuenta los aspectos de la soldabilidad del acero fundido al Cromo-Niquel.

#### 4.3.1 Soldabilidad del Acero Fundido al Cromo-Niquel 13/4

La técnica de la soldadura del acero fundido al Cromo Niquel 13/4, utilizada en los procesos de reparación y mantenimiento de Rodetes Pelton, presenta los siguientes aspectos :

- Soldadura con un depósito que tenga una composición química similar al metal base.
- Areas soldadas, precalentadas y tratadas térmicamente. En casos especiales, calentamiento local o pleno.

Durante el proceso de soldadura, debe tenerse en cuenta los siguientes factores : Temperatura de precalentamiento del metal base y la Temperatura de Interfase (IPT).

##### 4.3.1.1 Composición Química del Depósito de Soldadura

De acuerdo a las especificaciones técnicas, la composición química de los electrodos es la siguiente (valores en porcentaje) :

Composición en % :

	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
Mínimo	0.40	----	----	-----	12.0	3.50	0.40	-----
Máximo	0.07	0.80	0.40	0.30	0.025	13.0	4.20	0.70 Resto

Característica Mecánicas :

- Prueba de Impacto (ISO-V) : Mínimo 55 Joules
- Resistencia a la Tracción : 760 - 950 N/mm<sup>2</sup>
- Límite elástico : Mínimo 580 N/mm<sup>2</sup>
- Porcentaje de elongación : Mínimo 15%

Según las normas de la AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS), el electrodo correspondiente es : AWS E410 Ni Mo. Ver Anexo 3-2.

Para el caso específico de la reparación de los rodetes Pelton en la Central, utilizamos el electrodo CITOCHROM 134 fabricada en el país por la firma OERLIKON, cuyas características son : Electrodo de revestimiento básico, que deposita un acero aleado al Cr-Ni-Mo de estructura martensítica.

#### 4.3.1.2 Temperatura de Pre calentamiento y de Interfase

De acuerdo a las pruebas realizadas por los fabricantes de rodets en este tipo de acero, se ha establecido que para evitar el peligro de resquebrajamiento o la fractura frágil en el depósito de soldadura, se recomienda realizar el pre calentamiento del metal base por lo menos a 100°C, conjuntamente a temperaturas de interfase IPT o de capas intermedias, de 150°C a 250°C. Estas condiciones de trabajo, aseguran menores esfuerzos internos al final de la

soldadura.

Los rangos de la temperatura de Interfase coinciden aproximadamente con los rangos de temperatura de la transformación martensítica del ACERO Cr 13, Ni 4, Mo 0.5. Esto resulta ser una condición metalúrgica, que dependiendo de la forma de la estructura de la transformación durante o después de la soldadura, variará la deformación plástica y el comportamiento del esfuerzo.

Cuando se tiene  $IPT < M_f$  en el depósito de soldadura se presenta una tendencia a la fractura frágil. Esto se atribuye a la fragilidad del hidrógeno, lo que quiere decir que a bajas temperaturas de soldadura, el porcentaje de difusión del hidrógeno es muy bajo. En estas condiciones un posterior calentamiento de la soldadura martensítica fría alrededor de 250°C es recomendable, de lo cual deriva la importancia de utilizar electrodos secos.

En la Tabla Nº 2, puede observarse los puntos de transformación nominal para el acero fundido al Cr/Ni.

Las condiciones óptimas de soldadura respecto a la composición química, precalentamiento, temperatura de interfase y temperatura de revenido, se muestran en la Tabla Nº 3.

TABLA No. 2  
PUNTOS DE TRANSFORMACION NOMINAL PARA ACERO FUNDIDO 13% Cr.

MATERIAL	TEMPERATURA °C			
	AC1	AC3	Ms	Mf
13/1	740	880	350	200
13/4	660	880	260	100

TABLA No. 3  
CONDICIONES OPTIMAS DE SOLDADURA DEL ACERO FUNDIDO 13% Cr.

a)

COMPOSICION QUIMICA NOMINAL DEL ELECTRODO				
MATERIAL	C	Cr	Ni	Mo
13/1	0.08	12.5	1.0	-
13/4	0.05	12.5	3.5	0.5

b)

NIVELES DE TEMPERATURA °C			
MATERIAL	TEMPERATURA PRECALENTAM.	TEMPERATURA INTERFASE	RANGOS DE REVENIDO
13/1-65	150 - 250	máx. 350	680 - 700
13/4-75	100 - 150	máx. 350	590 - 610
13/4-90	100 - 150	máx. 350	490 - 510

#### 4.3.1.3 Influencia del Tratamiento de Alivio de Tensiones

En soldaduras con electrodos martensíticos Cr 13, Ni 4, por efecto del tratamiento térmico de alivio de tensiones internas, el esfuerzo de tensión disminuye de 120 a 95 Kg/mm<sup>2</sup>; mientras que el valor de la resistencia al impacto CHARPY es aumentada doblemente de 3 - 4 Kgm/cm<sup>2</sup> a 6 - 8 Kgm/cm<sup>2</sup>.

La resistencia a la fatiga no mejora fuera de los niveles normales de 40 Kg/mm<sup>2</sup>.

#### 4.3.1.4 Comparación de los Materiales Soldables de Acero Cr 13/ Ni 1 y Cr 13 /Ni 4

Con respecto a la técnica de la soldadura, el material 13/4 sobre el material 13/1, tiene las siguientes ventajas :

- Menor endurecimiento, mejorando la capacidad de deformación de la zona térmicamente afectada.
- Debido a menores puntos de transformación, mejora las condiciones de esfuerzos internos al final de la soldadura.
- Menores temperaturas de soldadura.
- Menores temperaturas de revenido (tempering)

#### 4.3.1.5 Resumen

En general, los principales aspectos técnicos de la soldabilidad del acero fundido Cr/Ni, 13/4 se resume lo siguiente:

- En los procesos de reparación con soldadura se recomienda utilizar electrodos de composición química similar al del material base, que garantice una soldadura de alta resistencia a los esfuerzos estáticos y dinámicos.
- El precalentamiento debe realizarse como mínimo a 100°C y con una temperatura de interfase de 150 a 250°C, lo cual se sitúa dentro de la zona de la transformación martensítica del acero mencionado.
- En pequeños aportes de soldadura, tales como porosidades pueden realizarse en frío, con electrodos que tengan una composición similar al del metal base; recomendándose un calentamiento posterior a la soldadura cerca a los 250°C a fin de expulsar el hidrógeno.
- El tratamiento de alivio de tensiones, después de la soldadura depende de la localización y la extensión de la misma, siendo necesario realizarla cuando se suelda áreas de alto esfuerzo.

#### 4.3.2 Procedimientos

Para ejecutar una reparación parcial, el rodete una vez ubicado en el taller, se coloca con el eje horizontal sobre un soporte metálico y se siguen los procesos que se indican :

- Inspección y control dimensional.
- Preparación de la superficie.
- Soldadura.
- Esmerilado.
- Controles finales.

Descripción de los procesos.

##### 4.3.2.1 Inspección y Control Dimensional

Este proceso es de gran importancia, porque permite cuantificar la magnitud del desgaste que presentan la superficie de las cucharas referidas a un perfil inicial cuando el rodete es nuevo. En esta inspección es posible distinguir visualmente la zonas críticas y defectuosas a ser reparadas. Debe anotarse en una hoja de control o formato todos los defectos notorios (dimensiones de las zonas erosionadas, fisuras) a fin de llevar el historial del rodete en cada período de funcionamiento.

En esta fase se recomienda la utilización de los líquidos penetrantes como ensayo no-destructivo, o magnaflux a fin



de detectar posibles fisuras o porosidades en las zonas activas de los álabes.

#### 4.3.2.2 Preparación de la Superficie

Las fallas observadas en el álabe como resultado del control con líquidos penetrantes y la inspección visual, tales como las erosiones, cavidades o fisuras, son rebajadas con piedras de esmeril o brocas, de modo que puede aplicarse la soldadura con mayor facilidad y eficacia. Es decir debe efectuarse una preparación de la superficie eliminando las aristas o bordes agudos en las paredes de las cavidades.

#### 4.3.2.3 Soldadura

Según lo señalado en el punto 4.3.1, debe utilizarse un electrodo de la misma composición química que el metal base. La composición química del electrodo CITOCHROM 134 que utilizamos se muestra en el Anexo 4.

Para el secado del electrodo, es necesario calentar en un horno a 250°C durante 03 horas y luego mantenerlo a 100°C en un horno portátil mientras se aplica la soldadura.

El precalentamiento del metal base se realiza a un valor promedio de 120°C utilizando gas propano.

El aporte de soldadura se realiza manualmente, con el

método del arco eléctrico, regulando el amperaje de la máquina de acuerdo al diámetro del electrodo. Durante el proceso se limpia los depósitos de escoria luego de cada cordón aplicado.

Cuando se aplica la soldadura sobre las aristas centrales y/o filos de ataque de las cucharas, para recuperar niveles de desgaste de 2 a 3 mm, es necesario efectuar un post-tratamiento térmico local, de alivio de tensiones, calentando lentamente con quemadores de gas propano hasta 600°C, luego cubrir con telas de asbesto para asegurar un enfriamiento lento. Este proceso es decisivo para el éxito de la reparación.

#### 4.3.2.4 Esmerilado

El esmerilado de la superficie soldada se efectúa en dos fases :

- a) Se realiza el desbastado con piedras de esmeril de grano grueso y mediano (14 ó 20 y 60), cuidando de conservar el correcto perfil hidráulico en las copas de las cucharas, de acuerdo a las plantillas de control.
- b) Culminando el desbastado, se efectúa el acabado o pulido final de la superficie activa de todas las cucharas utilizando discos lamerales (lijas circulares)

de grano mediano y fino a fin de obtener una superficie lisa.

En la fig. Nº 4, se observa zonas del álabe soldadas y esmeriladas durante reparación parcial.

#### 4.3.2.5 Controles Finales

- Se efectúa el control con líquido penetrante en todas las cucharas, a fin de verificar la presencia de defectos superficiales. También puede realizarse el control con el método magnético.
- Los criterios de aceptación (defectos tolerables) del ensayo no destructivo realizado, deben estar de acuerdo a las especificaciones de calidad CCH 70 - 2.
- Finalmente se realiza el control del desgaste del perfil de las copas de las cucharas y del espesor de los bordes laterales con la finalidad de tener valores referenciales para los sucesivos controles por mantenimiento preventivo durante el servicio.



Fig. Nº 4 Reparación parcial: Control con plantilla soldadura arista central y zonas esmeriladas del álabe.

#### 4.3.3 Tipos de Reparaciones Parciales

Las reparaciones parciales pueden clasificarse en tres tipos de acuerdo a los defectos que se presentan en el rodete.

##### 1) Defectos que se presentan sobre el fondo del álabe (coppa)

Son defectos que se presentan debido al propio uso del rodete y son producidos por la erosión.

- Si estos defectos tienen una profundidad de 01 mm., se eliminan con piedra de esmeril. Normalmente se permite un máximo rebajamiento de 5 mm.
- Si la profundidad del defecto es mayor que 01 mm., luego del rebaje, se deberá intervenir con soldadura. Esta intervención es la más frecuente que se presenta en el mantenimiento normal del rodete y se ejecuta en él, mantenimiento rutinario.

##### 2) Defectos o fisuras que se presentan en los filos de ataque (boca de la cuchara)

Las fisuras que se presentan en los cuchillos frontales o boca de la cuchara deben ser reparadas a tiempo a fin de no comprometer la integridad del rodete.

- Cuando la longitud de una fisura no supera los 70 mm., su reparación puede ser postergada de 3 a 4 semanas, tomando en cuenta que de todas maneras debe realizarse un agujero de contención al extremo de la fisura de 6 a 8 mm. de diámetro. Considerando que estas fisuras se detectan cuando el rodete está en servicio, debe solicitarse la parada de la turbina y preferentemente proceder a la reparación de inmediato.
  - En estos casos se abre la fisura con discos de esmeril, se controla con líquido penetrante, y se procede a la soldadura precalentando la zona adyacente a la fisura. Además, es imperativo luego de la soldadura realizar el tratamiento térmico de distensión a 590/610°C con gas propano.
  - Cuando se reparan fisuras de longitudes mayores a 100 mm., es recomendable efectuar un tratamiento térmico total en horno hasta 590/610°C por 08 horas. Como parte final del proceso debe controlarse con líquido penetrante o magnaflux todas las zonas reparadas.
- 3) Defectos (fisuras) que se presentan en la raíz del álabe

Estos defectos se presentan sobre el disco, entre álabe y álabe, es decir en la raíz o cuello.

Cuando estas fisuras se presentan, es decir son detectadas, estando el rodete en operación (instalado en la turbina), se esmerila; si dicho defecto se elimina con desbaste de hasta 6 a 8 mm. de profundidad, el rodete puede continuar trabajando sujeto a inspecciones y controles permanentes.

Si la profundidad de la fisura supera los 8 mm., es necesario desmontar el rodete de la Turbina y proceder a su reparación en el taller.

Este proceso de reparación se ejecuta de la siguiente manera :

- a) Esmerilado hasta eliminar el defecto, controlando con líquido penetrante. La abertura final de esta zona deberá tener forma de "V" a fin de facilitar los cordones de soldadura.
- b) Pre calentamiento en la zona del disco del rodete, abarcando un mínimo de tres álabes y el dorso de la raíz del álabe afectado. Un medio eficaz para este calentamiento a través de resistencias eléctricas.

La temperatura de pre calentamiento de 150 °C, debe mantenerse durante la aplicación de la soldadura.

- c) Soldadura con electrodos Cr-Ni 13/4. Culminada la soldadura se cubre con tela de asbesto (aislamiento





las siguientes :

a) Reparaciones en el exterior

Desde la puesta en servicio de los Grupos Generadores de la Central Mantaro, las reparaciones parciales de los rodets se efectúan en el Taller Mecánico de Campo Armíño, mientras que las reparaciones integrales, hasta el año de 1984 se venían efectuando en el Taller del Fundidor, o sea en la firma GEORG FISCHER de Suiza; todo esto, considerando que para llevar a cabo se requiere de una infraestructura adecuada y tecnología específica.

En este tiempo, aún no se contaba en el Taller con los equipos de precalentamiento y el horno para tratamiento térmico; a falta de esta implementación entre 1981 y 1984 se enviaron a Suiza 07 rodets que habían cumplido su primer ciclo de vida con un desgaste mayor al 30%.

De acuerdo a los períodos de utilización de los rodets, las ruedas 1 y 2 fueron las primeras en alcanzar dicho desgaste, siendo necesaria la reparación integral; éstas alcanzaron 29,832 y 20,053 horas de operación respectivamente.

El tiempo de reparación por rodete de 10 meses, más los tiempos de transporte y otros superaron los 16 meses.

b) Reparación en el país

En Abril de 1985, se inicia la reparación integral de un rodete en el Taller de METAL EMPRESA en Lima, con participación parcial del personal de Mantaro y apoyo técnico temporal de un ingeniero de la fábrica Georg Fischer de Suiza. En dicho taller se efectuó la soldadura y el esmerilado, completándose el proceso de reparación con el tratamiento térmico y balanceo estático en el Taller de Campo Armiño.

Por motivos diversos esta reparación se realizó en 16 meses.

En el año siguiente entra en operación el Taller - Horno para la reparación de los rodetes Pelton de las Centrales Mantaro y Restitución en Campo Armiño, iniciándose entonces la reparación integral del primer rodete efectuado en dicho taller desde Enero de 1987, a cargo del personal de Mantenimiento del Complejo Mantaro.

Desde entonces, hasta la fecha se han efectuado la reparación integral de 03 rodetes y actualmente se encuentra en proceso de reparación 03 rodetes de la Central Mantaro.

4.4.2 Infraestructura del Taller

Como parte del proyecto de la Tercera Etapa del Complejo Hidroeléctrico Mantaro I, es decir el proyecto de la Central

Restitución, se construyó en Campo Armiño un Taller y se implementó con toda la infraestructura que permite la ejecución de reparaciones integrales de los Rodetes Pelton de las Centrales MANTARO y RESTITUCION.

El Taller - Horno de reparación de rodets de Campo Armiño, cuenta con los siguientes equipos principales :

- 01 horno eléctrico a resistencias, con sistema de control automático de temperaturas mediante programador electrónico.
- 02 equipos para precalentamiento eléctrico por resistencias de 55 KVA cada uno, con control automático.
- Máquinas de soldar rotativas y estáticas.
- 01 compresor de tornillos, con capacidad para el accionamiento de esmeriles neumáticos en la reparación simultánea de tres rodets.
- 02 equipos para controles no destructivos (Magnaflux) en la detección de defectos en las cucharas de los rodets.
- Esmeriles eléctricos y neumáticos.
- 01 equipo hidráulico para balanceo estático de rodets.
- 01 grúa de 40 Toneladas de capacidad.
- 01 balanza con capacidad de pesaje de 40 Tn., (actualmente en instalación), etc.

#### 4.4.3 Actividades para la Reparación

La tecnología aplicada para la Reparación Integral de un Rodete Pelton, incluye los siguientes procedimientos :

- Inspección y control dimensional.
- Desbastado para ensayos no destructivos.
- Ensayos No Destructivos : Líquido penetrante y Magnaflux.
- Desbastado de las zonas defectuosas (fisuras, porosidades, etc.).
- Soldadura de los defectos y zonas desgastadas de acuerdo a los resultados del control dimensional.
- Esmerilado total.
- Ensayos No Destructivos de acuerdo a las Especificaciones de Calidad CCH 70-2.
- Controles Dimensionales Finales.
- Balanceo estático.
- Tratamiento térmico total.

La secuencia de las actividades que se desarrolla, se observa en el Cuadro N° 03.

Parte de las operaciones señaladas en las líneas precedentes se ejecutan también en una reparación parcial.

Descripción de los procesos.

##### 1) Inspección y control dimensional

El control dimensional del rodete tiene por objeto

registrar las dimensiones del álabe a ser corregidas o recuperadas. Para ello, se realiza lo siguiente :

- Se confecciona un formato para el control de las dimensiones del ancho y largo de las cucharas. Ver fig. 5
- Control del desgaste en las copas de las cucharas y del espesor de los bordes laterales de las mismas.
- Registrar en un formato, las dimensiones de los defectos notables en el álabe (fisuras, cavidades).

El registro de las dimensiones del ancho y largo de las cucharas, permiten controlar las deformaciones de dichas distancias durante y al final de la soldadura.

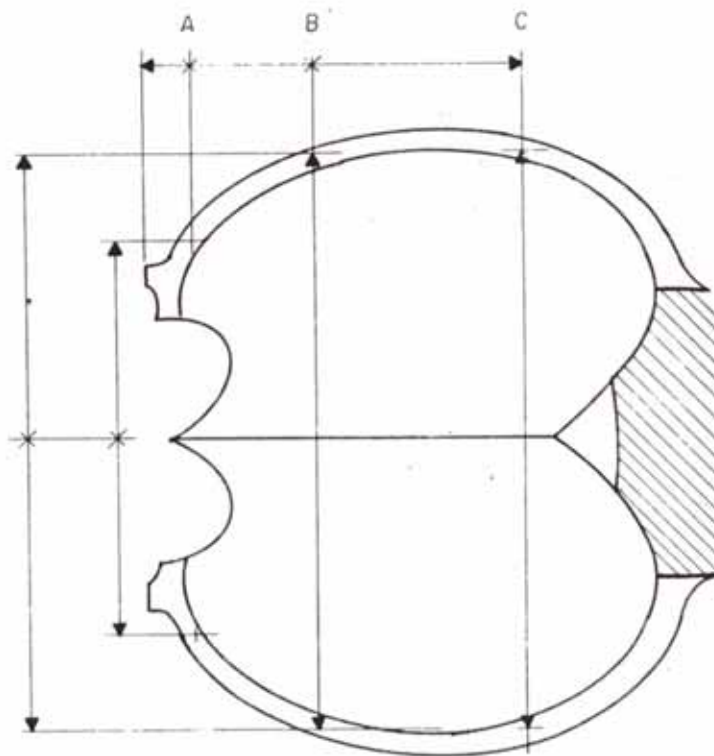


Fig. No. 5 Puntos de control dimensiones ancho y largo del álabe.

2) Desbastado para Ensayos No Destructivos

Se realiza el desbastado con piedras de esmeril, de todas las superficies erosionadas y fisuradas del álabe a fin de facilitar la aplicación de líquidos penetrantes y/o magnaflux y como parte de la preparación de la superficie para la soldadura.

3) Ensayos No Destructivos

Se aplica líquidos penetrantes a la superficie activa a la totalidad de los álabes teniendo mayor cuidado en los filos de ataque y raíz de las cucharas. Ver Fig. 6.

En reemplazo del líquido penetrante o como complemento de este puede aplicarse partículas magnéticas.

También puede aplicarse el ensayo por ultrasonido en las zonas del disco central adyacente a las raíces de las cucharas a fin de determinar la presencia de posibles defectos internos.

4) Desbastado de las zonas defectuosas

Del resultado de los controles con líquido penetrante deben eliminarse completamente todas las indicaciones defectuosas, incluyendo las mínimas hendiduras (cortes, poros, etc.). En caso de fisuras en la raíz del álabe o en los filos de ataque debe abrirse toda la zona del defecto.

Fig. Nº 6

ZONAS IMPORTANTES DEL LABE  
A CONTROLAR CON EL METODO  
NO DESTRUCTIVO



ZONAS IMPORTANTES A CONTROLAR

5) Soldadura de los defectos y zonas desgastadas

Para la aplicación de la soldadura durante una reparación integral se sigue el siguiente procedimiento :

a) Acondicionamiento y fijación de resistencias eléctricas en ambas caras del disco del rodete y álabes a soldar para efectuar el precalentamiento con el equipo eléctrico R6-BT-50. Se regula la temperatura a 150°C. Ver Fig. 7 y Fig. 8.

b) Se suelda una primera capa longitudinal en la superficie externa adyacente al borde del álabe, que sirve como refuerzo para amortiguar la contracción transversal debido al aporte de soldadura en las copas de las cucharas. Esta capa debe tener un ancho entre 40 y 60 mm. dependiendo del tamaño del álabe; para el caso de las ruedas del Mantaro se ejecuta una banda de 50 mm.

De acuerdo a mediciones realizadas, se establece que una banda exterior soldada con electrodos de 5 mm. de diámetro, inclina las paredes laterales de las cucharas hacia afuera aproximadamente en tres milímetros y con el soldado de la superficie interior éstas regresan a su posición inicial.

c) Soldadura de las fisuras en la raíz y filos de ataque



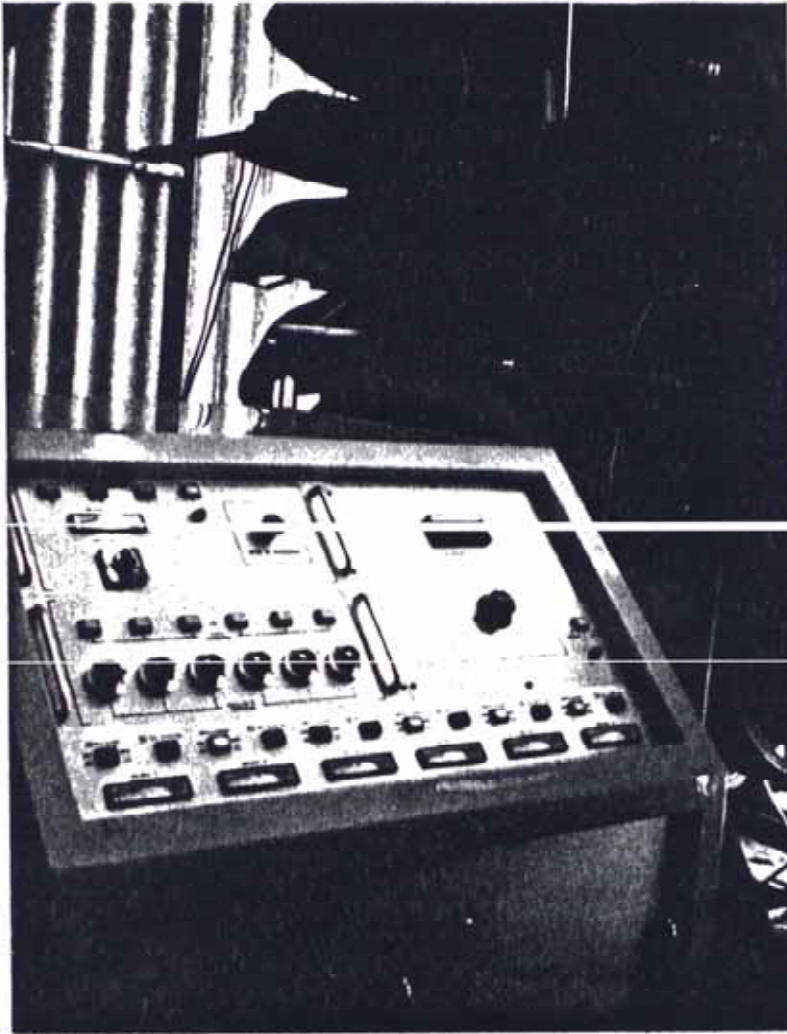


Fig. Nº 7  
Vista parcial Rodete  
equipo de precalenta-  
miento eléctrico.

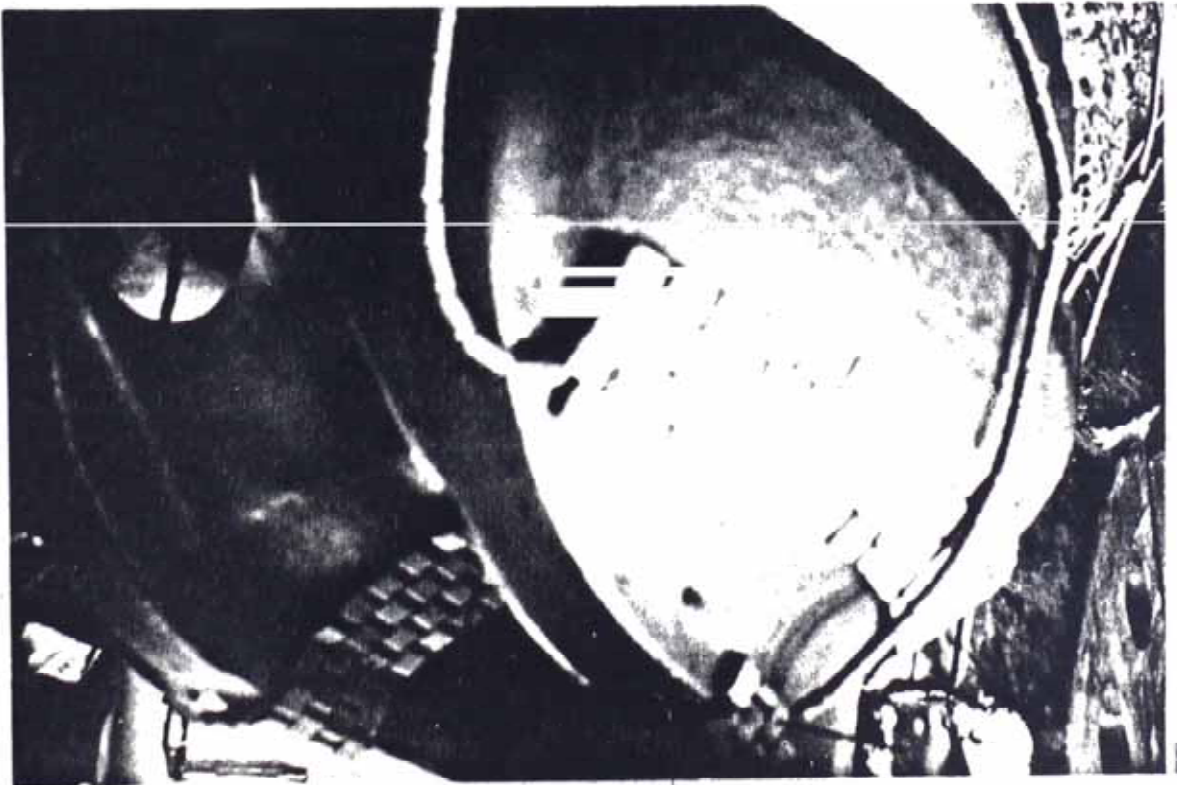


Fig. Nº 8 Fijación Resistencias eléctricas de precalentamiento.

reconstruyendo la boca de la cuchara con electrodos de 2.5 y 3.15 mm. de diámetro.

d) Relleno de soldadura de las superficie de la copa de las cucharas en capas sucesivas.

- Los cordones se aplican del fondo de la copa hacia la boca y se suelda alternadamente en ambos lados. Ver Fig. 9.

- El espesor de la soldadura por capa se controla con plantillas previamente elaboradas.

- Antes de aplicar la última capa de soldadura se efectúa un pre-esmerilado a fin de facilitar el acabado y obtener un sobreespesor uniforme en toda la superficie.

- Normalmente se da un sobreespesor de tres milímetros, para el esmerilado total.

- Durante el proceso de soldadura se controla la temperatura de Interfase. En los procesos realizados en el taller se ha encontrado un valor promedio de 170°C.

- Durante todo el proceso de soldadura, el precalentamiento del disco del rodete no debe interrumpirse.



Fig. № 9

## 6) Esmerilado total

El proceso de esmerilado total se realiza sobre la superficie soldada de las copas de los álabes así como en el dorso de los filos de ataque y los bordes laterales. Se busca con ello encontrar el perfil hidráulico original del álabe tal como si se tratara de un rodete nuevo.

Es importante conservar en la superficie activa de los álabes los ángulos de descarga; esto se logra con las plantillas de control elaboradas de acuerdo a los planos del fundidor GEORG FISCHER y del diseñador RIVA.

El proceso de esmerilado se realiza de la siguiente forma :

- a) Marcar con puntos o rayas los contornos interior y exterior del borde de las cucharas de acuerdo a plantilla.
- b) Marcar con una raya la línea media de la arista central tomando como referencia la línea prolongada de ambas caras de la brida del disco del rodete, las cuales no sufren ninguna alteración por efectos térmicos de la soldadura.

Proceder al esmerilado de la arista central conservando la altura según plantilla de control.

Este proceso se realiza con discos de esmeril.

c) Esmerilado del interior de las copas de las cucharas de acuerdo a las plantillas de control preparadas con una holgura máxima de 1 mm.

En esta parte se utiliza piedras de esmeril rectas y esféricas de grano grueso. Mejorar el acabado de la superficie con piedras de grano mediano.

Esmerilar los bordes de los filos de ataque según plantillas. Ver Fig. 10.



Fig. Nº 10 Esmerilado durante la reparación integral. Control filo de ataque.

d) Esmerilado del dorso de los filos de ataque controlando el espesor de la boca de la cuchara.

Esmerilado de la banda externa de refuerzo en los bordes laterales de las cucharas.

e) Pulido final de toda la superficie del álabe con discos lamerales o lijas circulares de grano 60 y 120 respectivamente.

#### 7) Ensayos No-Destructivos

Se realiza el control con líquido penetrante y partículas magnéticas a toda la superficie del álabe.

Los criterios de aceptación de los resultados de dichos ensayos se rigen por las normas CCH 70-2, que son especificaciones técnicas elaboradas por constructores europeos de maquinaria hidráulica.

Esta norma en su segunda edición fue elaborada por un grupo de estudio de Constructores y Fundidores europeos en Junio del año 1,979 y se denomina :

"CAHIER DES CHARGES DE RECEPTION DES PIECES EN ACIER MOULE POUR MACHINES HYDRAULIQUES", que traducido al español significa :

Pliego de condiciones de recepción de las piezas en Acero fundido para máquinas hidráulicas.

Esta norma, agrupa criterios de aceptación para los ensayos no destructivos típicos que son : líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido y radiografía.

Respecto a los ensayos por líquidos penetrantes, están establecidos Clase de Calidad de 1 a 5; siendo admisibles, para trabajos de reparación de ruedas Pelton, resultados hasta la clase 3. Las dimensiones de defectos tolerables se muestran en el Anexo : 8-1.

Asimismo, para el examen por partículas magnéticas se admite resultados hasta la Clase 3.

Luego de la aplicación de estos ensayos según los resultados obtenidos los defectos no tolerables deben ser resanados con esmerilado y soldadura.

En la Fig. 11, se muestra la aplicación del método de prueba por partículas magnéticas.

#### 8) Controles Dimensionales Finales

Los controles principales que se realizan son :

- Control del espesor en bordes de álabes.
- Control de la distancia entre puntos periféricos ubicados en el borde del diámetro exterior entre dos álabes.
- Control del ancho y largo del álabe.

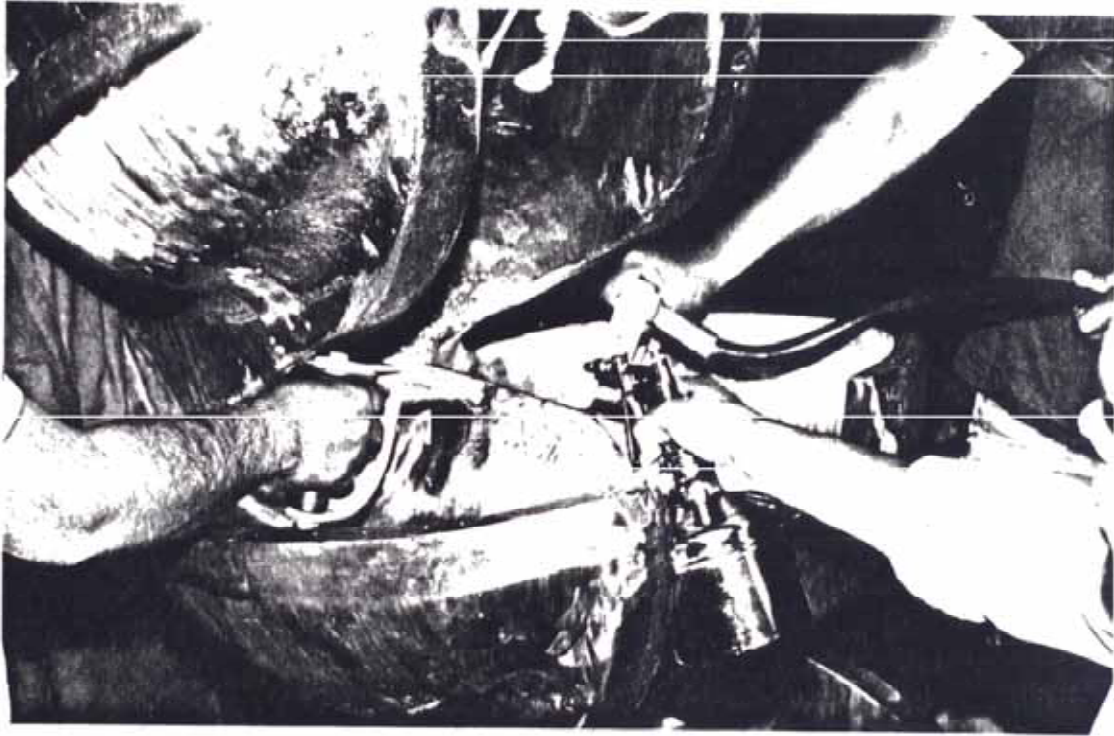


Fig. Nº 11 Control No Destructivo Magnético. Magnetización por pinzas



- Control de la profundidad de la copa del álabe.

Estos valores obtenidos en el esmerilado total al final de la reparación integral, se comparan con los valores dimensionales de diseño.

Normalmente es admisible una variación de hasta 02 mm. en las dimensiones del ancho interior del álabe.

#### 9) Balaneo Estático

El balaneo estático de un rodete se realiza para lograr que el centro de gravedad del rodete coincida con el centro de gravedad del eje del Grupo Generador.

Dentro de los parámetros de diseño del rodete se fija el valor del torque de desbalance admisible. Este valor debe ser respetado durante la reparación integral, puesto que tendrá incidencia directa para las pruebas de balaneo dinámico que se realiza con rodete instalado en el grupo generador.

Para calcular el peso de desbalance admisible, efectuamos lo siguiente :

##### a) Rodetes Central Mantaro :

Valor (torque) Desbalance Admisible

- Según diseño RIVA :

$$\text{Desbalance} \quad 75 \text{ Kg x cm.} \quad (1)$$

$$\text{- Torque} \quad = W \times r \quad (2)$$

Donde :  $W$  = diferencia de peso entre dos zonas extremas opuestas del álabe.

$r$  = radio exterior del rodete = 162,2 cm.

Igualando (1) y (2) se obtiene :

$$W = 460 \text{ gr.}$$

Es decir, el peso de desbalance máximo admisible para los rodetes de la Central Mantaro es de 460 gramos.

#### b) Rodete Central Restitución

De acuerdo a datos proporcionados por el diseñador RIVA CALZONI, el valor del desbalance admisible por un radio medio del rodete de 185 cm. es de 6.48 Kg., que equivale a un torque de 1200 Kg x cm.

El alto valor del torque del rodete se explica por la baja velocidad del rodete, que es de 200 RPM.

$$W = 6.48 \text{ Kg.}$$

Entonces, el peso de desbalance máximo admisible en estos rodetes es de 6.48 Kilogramos.

c) Corrección del error de balanceo

El error de balanceo o el exceso de peso en un extremo del rodete puede corregirse por los siguientes medios:

- Por empernado de una pieza metálica en forma de barra que se fija a la bocamasa del rodete.
- Por esmerilado en la parte posterior de la cuchara, incluyendo si es necesario a las dos cucharas adyacentes.

d) Procedimiento del Balanceo

En el Taller de Reparaciones de Campo Armiño, se dispone de un equipo hidráulico constituido por una motobomba de aceite que se acopla a un pistón vertical, en el que se apoya horizontalmente un disco metálico plano, a través de un hongo.

El proceso de balanceo se realiza de la siguiente forma :

- Colocar el rodete apoyado sobre el disco.
  - Arrancar la bomba de aceite y controlar el grado de desbalance con un nivel de burbuja de precisión
-

0.005 mm/m.

- Colocar pesas de compensación sobre el rodete hasta que el nivel de burbuja arroje una lectura cero.
- Compensar en el rodete o corregir el error del desbalance, en el equivalente de las pesas añadidas.
- Levantar la rueda, girarla 90° y repetir el control con el nivel de burbuja.

En la Fi. 12, se observa el equipo hidráulico para balanceo estático y el posicionamiento de un rodete de la Central Mantaro para dicha prueba.

#### 10) Tratamiento Térmico

En el proceso de reparación integral de un rodete Pelton de acero fundido al Cromo-Níquel 13/4, para el alivio de las tensiones internas (Stress Relieving) después de la soldadura, según recomendaciones del fabricante, se realiza la siguiente curva de tratamiento :

- Calentamiento : Gradiente 30 °C/h  $\pm$  5°C hasta 580°C.
- Temperatura de permanencia : 580°C durante 8 horas.
- Enfriamiento : Gradiente 30 °C/h  $\pm$  5°C hasta 250°C.

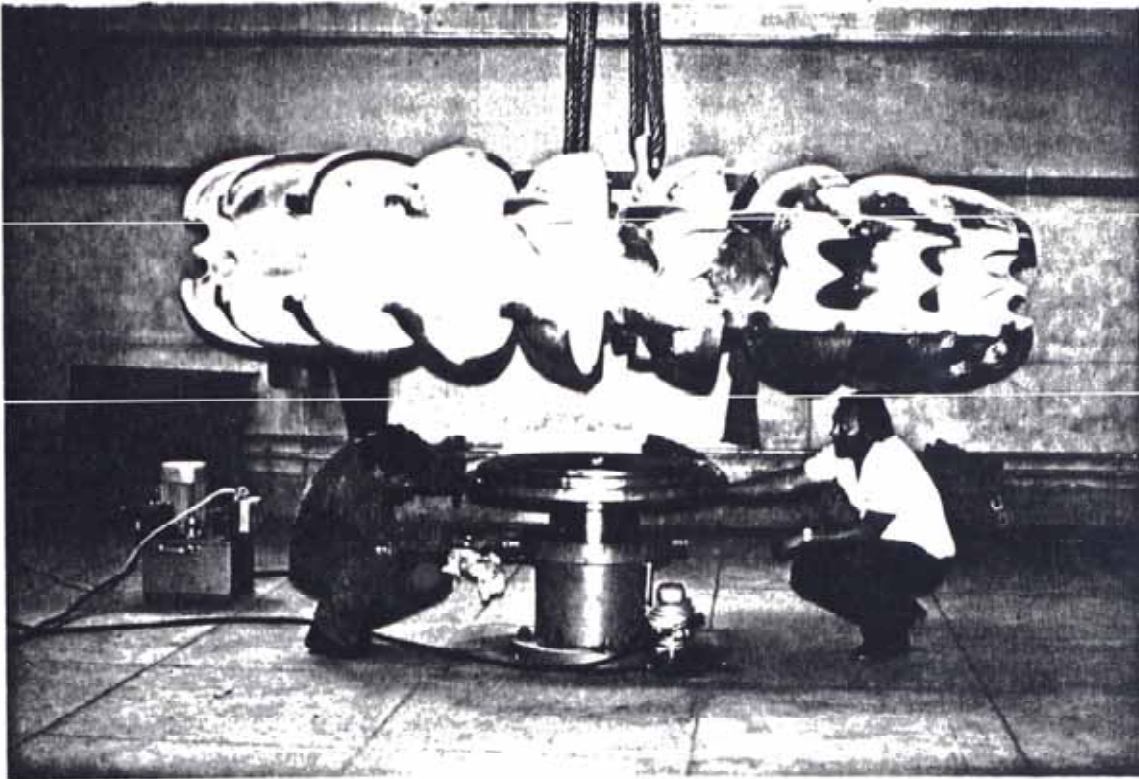


Fig. Nº 12 Equipo para balanceo estático y posicionamiento rodete para prueba.

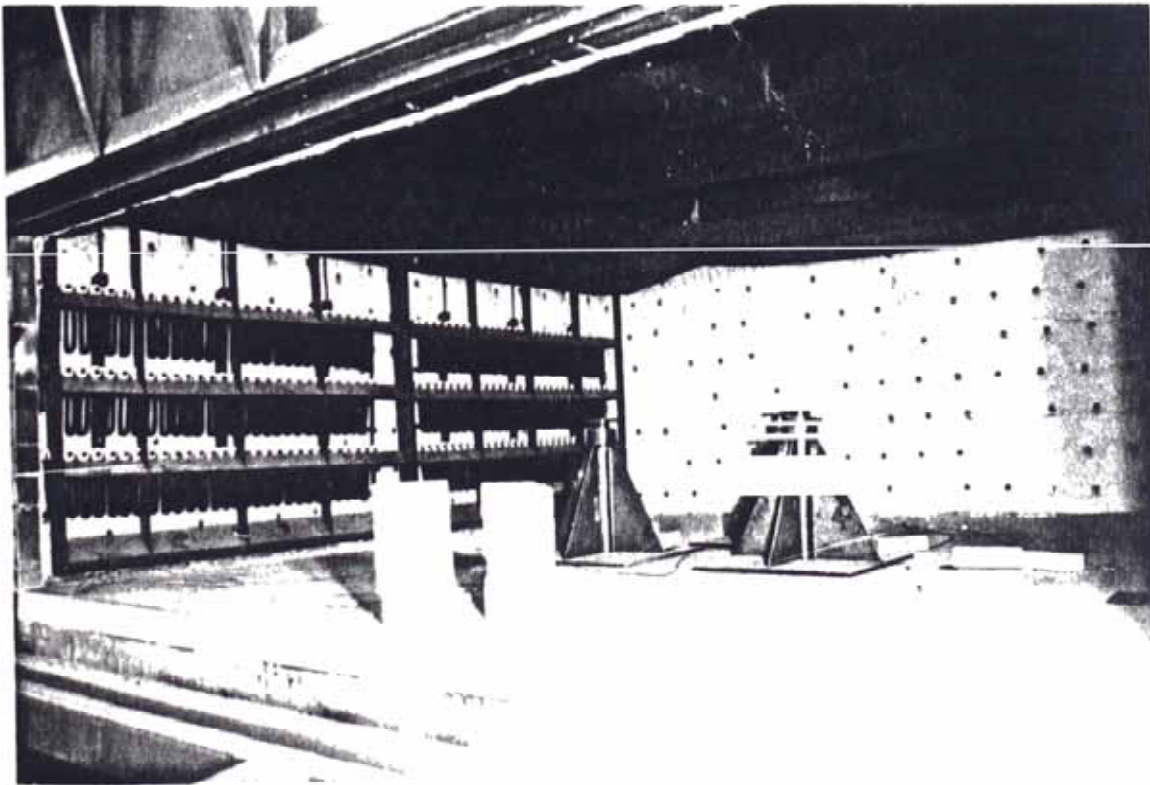


Fig. Nº 13 Parte interior del horno eléctrico para tratamiento térmico.

En la fig. 13, se observa la parte interior del Horno eléctrico para Tratamiento Térmico instalado en el Taller de Campo Armiño.

Finalmente, culminado con el proceso de reparación integral del rodete, en la fig. 14, se observa dicha pieza, en fase de montaje en la Turbina, para reinicio de operación.

#### 4.4.4 Síntesis de la Reparación Integral del Rodete Pelton N°9: Central Mantaro

Como una aplicación práctica de la tecnología descrita para la reparación integral, se hace una síntesis de los procedimientos ejecutados, en la reparación del rodete Pelton N° 9:53821-1, en el año de 1988 y que actualmente se encuentra en operación regular en las turbinas de los Grupos Generadores del Mantaro.

##### a) Antecedentes de Operación

El rodete Pelton N° 9:53821-1, suministro de la segunda etapa, inició su operación el 20 de Enero de 1,980 en la turbina del grupo 01. Desde entonces trabajó durante 04 períodos hasta el 27 de Marzo de 1987, acumulando un total de 31,319 horas de funcionamiento en su primer ciclo de vida.

En dicho rodete se tuvo un desgaste promedio de 14 mm. en la copa de los álabes, respecto a la dimensión original de 46 mm.

b) Inspecciones y controles dimensionales

En Setiembre de 1987, se efectuó la inspección y control dimensional de los álabes, cuyos valores se muestran en el Anexo : 7-1. Asimismo, se han efectuado mediciones de las distancias longitudinales y transversales entre puntos del borde de los álabes, para controlar las variaciones entre dichos puntos por efectos térmicos de la soldadura.

c) Ensayos No Destructivos Preliminares

Con fecha 22.09.87, se aplicó líquido penetrante y partículas magnéticas en las zonas activas de los álabes, procediéndose posteriormente al esmerilado de los defectos, como preparación de la superficie a soldar.

d) Aplicación de soldadura

Con fecha 02.10.87, se dió inicio al proceso de soldadura manual por arco eléctrico y se culminó el 28.02.88, utilizando un tiempo efectivo de 4.5 meses de soldadura, en turnos de 08 horas.

El precalentamiento del rodete, se realizó con el equipo eléctrico R6 BT-50, y se reguló a una temperatura promedio de 120°C en la zona del disco.

Cabe resaltar que en la soldadura de la copa de los álabes se aplicaron 04 capas de soldadura a fin de lograr un sobre espesor promedio de 2.5 mm. en toda la superficie de la copa del álabe, para facilitar un buen acabado en el esmerilado total.

El control correcto del perfil del álabe durante el proceso de soldadura se realiza a través de plantillas metálicas que se colocan en los puntos marcados en el metal base originalmente.

e) Esmerilado Total

El proceso comprende el esmerilado total de toda la superficie soldada en las copas, y el dorso del filo de ataque; se busca con ello encontrar el perfil hidráulico original del álabe, tal como si se tratara de un rodete nuevo.

El proceso comienza con el trazado del ancho del borde de los álabes y la línea media de la arista central.

La secuencia del proceso es el siguiente :

- Trazado del ancho del borde de los álabes.
- Trazado de la línea de la arista central.



Esmerilado de la arista central, y de la boca de la cuchara (filos de ataque).

- Esmerilado de las copas de las cucharas.
- Esmerilado dorso filo de ataque.
- Pulido final superficie activa del álabe con discos lamerales.

Es importante mantener, en la superficie de las copas, los ángulos de descarga; para lo cual se utilizan las plantillas de control, elaboradas de acuerdo a los planos del diseñador RIVA CALZONI.

Los trabajos de esmerilado en el rodete 09, se iniciaron el día 01.03.88 y se culminó el 10.08.88, empleando un tiempo de 5.5 meses en turnos de 08 horas.

En la realización de estos trabajos se han utilizado Abrasivos suministrados por las firmas nacionales ABRALIT y ASA, en cantidades que se muestran en la sección correspondiente.

#### f) Ensayos No Destructivos

Como ensayos no destructivos finales, se aplicó líquido penetrante y partículas magnéticas, en las superficies de los álabes con resultados satisfactorios de acuerdo a las normas CCH 70-2.

---

$$T = 150 \times 162.2 \text{ gr.cm.}$$

$$- T = 24.3 \text{ Kg x cm.}$$

El desbalance obtenido es menor que el valor de diseño (75 Kg. cm.).

#### i) Tratamiento Térmico

El proceso de tratamiento térmico total, para la distensión de esfuerzos internos en el metal soldado, se realizó entre el 20 y 23.08.88 en el horno eléctrico HUMBERT, con control automático de temperatura mediante programador electrónico. Se siguió la curva de tratamiento para el acero al Cromo Níquel 13/4, obteniendo óptimos resultados en cuanto se refiere a los niveles de temperatura. Ver Anexo : 6.

Curva realizada :

- Calentamiento : Gradiente 30 °C/h + 5 °C hasta los 580 °C.
- Temperatura de permanencia : 580 °C por 8 horas.
- Enfriamiento : Gradiente 30 °C/h + 5 °C hasta los 250°C en horno.

MATERIALES UTILIZADOS EN LA REPARACION DEL RODETE No. 09.

La lista de los materiales utilizados se indica en la siguiente relación :

DESCRIPCION	CANTIDAD
- Electrodo CITOCHROM 134 de $\varnothing$ 5.00 mm.	1232 Kg.
- Electrodo CITOCHROM 134 de $\varnothing$ 4.00 mm.	770 "
- Electrodo CITOCHROM 134 de $\varnothing$ 3.15 mm.	77 "
- Electrodo CITOCHROM 134 de $\varnothing$ 2.50 mm.	11 "
- Piedras de esmeril rectas $\varnothing$ 6x1x1", Tipo:A14-SB2A	50 Unid.
- Piedras de esmeril rectas $\varnothing$ 81x25x22 mm. Tipo:A14-SB2A	50 "
- Piedras de esmeril esférica $\varnothing$ 80x1/2" Tipo:A14-SB2A	50 "
- Piedras de esmeril esférica $\varnothing$ 80x1/2" Tipo:A60-QB2A	50 "
- Discos de esmeril $\varnothing$ 230x1/4" Tipo: BDA	60 "
- Discos de esmeril $\varnothing$ 180x1/4" Tipo: BDA	25 "
- Piedras de esmeril cónicas $\varnothing$ 1-3/4"x3x1 Tipo:A60-QB2A	50 "
- Piedras de esmeril cilíndricas $\varnothing$ 30x30x1/4 Tipo:W230	50 "
- Discos Lamerales $\varnothing$ 6x1-1/2" Grano: 50	30 "
- Discos Lamerales $\varnothing$ 6x1-1/2" Grano: 100	30 "
- Frascos de líquido penetrante	70 "

#### 4.5 TRATAMIENTOS TERMICOS

El tratamiento térmico que se realiza durante las reparaciones de piezas de acero fundido al 13%Cr - 4%Ni, consiste en el proceso de reconocido para distensión de tensiones internas después de la soldadura.

Este proceso consiste en calentar la pieza por debajo de  $A_{c1}$  (punto crítico de transformación durante el calentamiento que corresponde a una temperatura de equilibrio de fase) con el fin de eliminar las tensiones internas sin producir variaciones notables en las propiedades mecánicas, mantener a la temperatura de umbral y enfriar lentamente.

El tratamiento térmico posterior

ratura de umbral por varias horas.

Para el caso de aceros al Cr-Ni, se tienen los puntos de transformación mostrados en la Tabla No. 02 y los niveles de temperatura para el revenido se muestra en la Tabla No. 03. (tratada en el punto 3.3.1.2)

Los materiales de acero al Cr-Ni en 13.1 y 13.4 son equivalentes a COR: 13.65 y COR: 134.75 respectivamente según denominación del fabricante GEORG FISCHER.

De acuerdo a consultas efectuadas al fabricante Georg Fischer, las ruedas Pelton fundidas en acero Cr/Ni, 13/4, pueden ser reparadas por lo menos diez veces y tratada en un horno. Con cada tratamiento térmico, el esfuerzo de tensión del componente será algo reducido y la tenacidad aumentada ligeramente.

#### 4.5.1 Aspectos del Tratamiento Térmico Sobre las Propiedades Mecánicas de un Depósito de Soldadura

De acuerdo a pruebas realizadas en fábrica, se ha establecido una relación entre las propiedades mecánicas de un depósito de soldadura respecto a la influencia del tratamiento térmico.

Con referencia al Acero Fundido Cr-Ni, COR: 134.75, se tienen las siguientes diferencias :

- Depósito de Soldadura sin Tratamiento Térmico

Resistencia a la tracción : 110 Kg/mm<sup>2</sup>

Elongación : 5 %

Resistencia al impacto : 4 Kg.m/cm<sup>2</sup>

- Depósito de Soldadura con Tratamiento Térmico

Resistencia a la tracción : 70 a 80 Kg/mm<sup>2</sup>

Elongación : 15 %

Resistencia al impacto : 8 a 10 Kg.m/cm<sup>2</sup>

En los procesos de recocido del acero al Cromo, ferríticos martensíticos, sobre los 500°C, se forma Austenita finamente dispersa después del enfriamiento. Dicha Austenita se denomina Austenita Estable.

El máximo porcentaje de la austenita estable se presenta después del recocido a 600°C, siendo de aproximadamente 20%.

La energía de impacto es la máxima cuando el porcentaje de la austenita estable es más alto, lo que ocurre a 600°C. Esta característica se explica debido a que el material austenítico, tiene los mejores valores de impacto.

Las propiedades mecánicas y el porcentaje de austenita estable en el acero al Cr-Ni 13/4, con relación a la temperatura de revenido se muestra en la Fig. 15.

#### 4.5.2 Tratamiento Térmico en el Horno de Campo Armiño

En el taller de reparaciones de Rodetes Pelton de Campo Armiño, se dispone de un horno eléctrico a resistencias para tratamiento térmico.

Las características principales del equipo son las siguientes :

- Control automático de temperatura mediante programador electrónico; también puede controlarse la temperatura manualmente mediante un regulador de
- Para el control de temperatura del rodete, dispone de 07 Termocuplas tipo K : Níquel-Cromo/Níquel-Aluminio hasta 1,150°C.
- Dos ventiladores para recirculación de aire; una aspiradora tipo válvula estrella.
- Las dimensiones del Horno, permiten albergar rodetes del tamaño de la Central Restitución : Diámetro exterior 4,190 mm., Ancho 1,000 mm.

La ubicación de las termocuplas sobre el rodete, se



muestra en la Fig. 16 y consiste en colocar 04 unidades en los álabes distribuidas cada 90° y 03 unidades en el disco del rodete.

Desde la puesta en servicio del horno eléctrico en Campo Armiño, el 08.12.86, hasta la fecha, se han efectuado una serie de tratamientos térmicos a los rodetes de la Central Mantaro. También se ha hecho extensivo el servicio de tratamiento a rodetes de la Central Hidroeléctrica CAÑON DEL PATO en Setiembre de 1987 y a los rodetes de la Central YAUPI de Centro Min-Perú en 1988, de acuerdo a curvas suministradas por el cliente.

#### RODETES DE LA CENTRAL MANTARO

Señalamos algunos tratamientos térmicos realizados en rodetes, durante reparaciones de defectos notables.

Rodetes Nros. 9 y 11 : Reparación de fisuras en áreas adyacentes al disco (raíces de 4 álabes) con la curva recomendada :

- Calentamiento : 30 °C/h hasta 580 °C
- Permanencia : 08 horas
- Enfriamiento : 25 °C/h hasta 250 °C

Rodete Nro. 8 : Reparación de rotura de un álabe (mitad copa derecha) Curva realizada :

- Calentamiento : 50 °C/h hasta 580 °C
- Permanencia : 08 horas
- Enfriamiento : 25 °C/h hasta 250 °C

Rodetes Nros. 6, 7, y 9 : Tratamiento por Reparación Integral, según curva normal para el acero 13/4.

Además se han realizado una serie de tratamiento térmicos durante las reparaciones parciales.

RODETES DE LA CENTRAL YAUPI : Tratamiento por Reparación Integral.

Por tratarse de un acero convencional de Cr-Ni en 13/1, se realizó la siguiente curva :

- Calentamiento : 30 °C/h hasta 650 °C
- Permanencia : 10 horas
- Enfriamiento : 25 °C/h hasta 250 °C

#### 4.6 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

En todo proceso de fabricación o reparación de una maquinaria, el Control de Calidad, constituye un proceso importante,

y dentro de estos controles, la Técnica de Ensayos No Destructivos, se aplica en las fases de reparación de los Rodetes Pelton.

Estos controles, tienen por objeto, detectar la presencia de defectos, tales como poros, grietas o fisuras en las piezas a examinar, que posteriormente deberán ser eliminados.

Dentro de los tipos de Ensayos No Destructivos, que se aplican mayormente en la reparación integral de rodetes, tenemos los Líquidos Penetrantes y las Partículas Magnéticas. En los talleres de los fundidores, se aplican también el ensayo por Ultrasonido, en las zonas del disco del rodete, adyacente a las raíces de los álabes.

En este capítulo haremos mención a los dos primeros ensayos señalados.

#### 4.6.1 Líquidos Penetrantes

##### 4.6.1.1 Conceptos Teóricos

El ensayo no destructivo por líquidos penetrantes, se basa en el principio físico de la Capilaridad de los líquidos, permiten la penetración en las discontinuidades abiertas a la superficie.

---

Tiene su campo de aplicación en la detección de defectos abiertos a la superficie tales como grietas, poros. Se aplica en metales ferrosos y no ferrosos, en materiales cerámicos, plásticos y vidrios no porosos.

La ventaja del método, está en que es independiente de la forma y geometría a examinar, requerir de un equipamiento mínimo y permitir gran sensibilidad en la detección de fisuras.

#### 4.6.1.2 Características de los componentes

La familia de materiales, para inspección por líquidos penetrantes, consiste en penetrantes visibles o fluorescentes, emulsificadores, solventes removedores y reveladores.

##### a) Líquido Penetrante

Debe reunir las siguientes características :

- Poder de penetración en discontinuidades y grietas muy finas.
  - Poder permanecer en discontinuidades gruesas.
  - No evaporarse o secarse rápidamente.
  - Permanecer en estado fluido para emerger fácilmente al aplicar el revelador.
-

Los líquidos penetrantes, teniendo en cuenta su composición química y el sistema que tenga para eliminación del exceso de penetrante en la superficie, se clasifica en tres grupos :

- 1- Penetrantes lavables al agua.
- 2- Penetrantes Post-emulsionables no lavables directamente agua y que requieren el uso de un emulsificador.
- 3- Penetrantes eliminable con solvente.

b) Revelador

El revelador es el agente que permite la operación del revelado, es decir pone de manifiesto los lugares donde ha habido retención del penetrante y extrae el líquido penetrante de la discontinuidad.

Los reveladores suelen ser de polvo seco o una dispersión de una sustancia polvorosa en un líquido con gran poder de absorción.

Las características que debe cumplir un producto revelador, debe ser lo siguiente :

- Debe ser absorbente.
- Constituido por polvo muy fino, para aumentar su poder absorbente.

#### 4.6.1.3 Metodología de Aplicación

El método de ensayo por líquidos penetrantes, comprende las siguientes operaciones

##### 1) Preparación de la Superficie

Todas las superficies sobre la cual se vaya a aplicar el penetrante, debe estar limpia y seca.

##### 2) Penetración

Se aplica el penetrante, de forma que esta se extienda sobre la superficie dando lugar a una película uniforme. El tiempo de permanencia de dicha película deberá ser tal que permita la máxima penetración del penetrante en la discontinuidad.

##### 3) Eliminación del exceso de penetrante

El exceso de penetrante ha de ser eliminado de la superficie. El método de limpieza dependerá del tipo de penetrante utilizado.

En caso de emplear penetrantes fluorescentes, se aconseja realizar la limpieza bajo luz negra para asegurarse de que no queden restos de penetrante que pudieran dar lugar a falsas indicaciones.

4) Revelado

Se aplica el revelador sobre la superficie procurando un depósito de una capa fina de espesor uniforme.

5) Observación

Se procede a examinar el objeto ensayado para detectar las posibles indicaciones producidas.

Esta observación se llevará a cabo bajo luz natural cuando se trate de penetrantes coloreados o bajo luz negra en caso de penetrantes fluorescentes.

4.6.1.4 Método de Aplicación según Norma ASTM-E-165-65

El tipo de penetrante utilizado determina variantes en la aplicación del método.

El procedimiento de Ensayo por líquidos penetrantes en la industria, viene regida por la norma ASTM-E-165: (Standard Recommended Practice for Liquid Penetrant Inspection Method) o Método práctico recomendado para Inspección por líquidos penetrantes. Esta norma define 02 métodos de Inspección, las cuales se subdividen en tres tipos de acuerdo a la siguiente tabla.

METODO A : INSPECCION CON LIQUIDO PENETRANTE FLUORESCENTE

TIPO 1 : Lavables con agua.

TIPO 2 : Post-emulsificables.

TIPO 3 : Removibles con solvente.

METODO B : INSPECCION DON LIQUIDOS PENETRANTES VISIBLES CO  
LOREADOS.

TIPO 1 : Lavables con agua.

TIPO 2 : Post-emulsificables.

TIPO 3 : Removibles con solvente.

Según lo recomendado por dicha norma, nos referiremos en detalle al METODO B, TIPO 1, por ser el método recomendado y más aplicado en la reparación rodetes Pelton.

ASPECTOS TECNICOS DEL METODO B - TIPO 1

La inspección utiliza un penetrante visible a la luz natural. El producto es usualmente de color rojo, de modo que produzca una indicación definida al ser contrastado con el revelador de color blanco.

PROCEDIMIENTO DE APLICACION

a) Preparación de las piezas a examinar

Toda la superficie a examinar debe estar limpia y seca



antes de aplicar el penetrante. Esta preparación implica la remoción de capas de pintura, óxidos, cascarillas, etc. Se efectúa la limpieza con agua o solvente.

Es importante realizar el secado posterior a la limpieza a fin de que no quede agua ni solvente retenido en los defectos.

b) Aplicación del Penetrante

Después que la pieza está totalmente seca y limpia, se aplica el penetrante; producto que puede aplicarse por inmersión, pulverización o por brocha dependiendo del tamaño de la pieza.

Respecto al tiempo de penetración, existen valores normalizados para los distintos procesos y tipos de aplicaciones, siendo recomendable considerar el tiempo señalado por el fabricante del producto. Generalmente el tiempo de penetración, está comprendido entre 10 y 20 minutos.

c) Remoción del exceso de Penetrante

El penetrante es removido de la superficie de la pieza por un lavado directo con agua; puede usarse también el producto solvente removedor o limpiador proporcionado por el fabricante.

El lavado puede realizarse con agua a presión lo cual no deberá exceder de 50 P.S.I. ó 3,5 bar, siendo recomendable utilizar un valor promedio de 30 P.S.I. ó 2.1 bar.

d) Revelado

El proceso de revelado consiste en la aplicación de una capa delgada de polvo muy fino sobre la superficie a examinar.

En el revelado por vía húmeda, se utiliza el producto que contiene el polvo de suspensión en un líquido, lo cual debe agitarse fuertemente para su aplicación por pulverización en una capa muy fina.

APLICACION DE LIQUIDOS PENETRANTES EN PROCESOS DE REPARACION DE RODETES PELTON

Este método de control no destructivo, se aplica en las fases de reparación parcial e Integral de Rodetes Pelton.

Durante el proceso de reparación integral, se aplica en los controles preliminares de preparación de la superficie previo a la soldadura, y como controles finales de la reparación luego del esmerilado total.

La especificación técnica de control por líquidos

penetrantes, aplicados en la reparación de maquinaria hidráulica, se rigen por las normas CCh 70-2.

El capítulo correspondiente a la prueba por penetrantes de la referida norma se denomina PT - 70-2 y se incluye en el Anexo 8-1. En ella, pueden observarse las dimensiones de los defectos tolerables, como criterios de aceptación según las clases de calidad 1 a 3.

#### 4.6.2 PARTICULAS MAGNETICAS

##### 4.6.2.1 Conceptos Teóricos

El método de Ensayos No Destructivos por Partículas Magnéticas consiste en la detección de campos de fuga por la formación de polos magnéticos a ambos lados de aquellas discontinuidades que interrumpen el camino de las líneas de fuerza. Una discontinuidad, tal como una fisura, inclusiones, etc. da lugar a un campo de fuga.

Por lo tanto éste método, puede detectar discontinuidades en materiales que pueden ser fuertemente magnetizados o ferromagnéticos.

El campo de fuga nos permite detectar la discontinuidad, mediante un detector o medio magnético, para lo cual se utiliza las partículas magnéticas que son atraídas por los campos de fuga dando lugar a la

discontinuidad.

El método de control consiste esencialmente en magnetizar oportunamente la pieza en examen y luego aplicar las partículas magnéticas, la cual se acumulará en correspondencia de los defectos superficiales, haciéndolo fácilmente visibles.

El método señalado, permite revelar defectos superficiales o sub-superficiales.

#### 4.6.2.2 Método Standar para Examen por Partículas Magnéticas

El método de aplicación del examen por partículas magnéticas, se rige por las normas ASTM-E-109, que describe técnicas como ensayo no destructivo para detección de fisuras y otras discontinuidades cerca a la superficie de materiales ferromagnéticos.

Fases del Método de Ensayo :

En el desarrollo del control magnético, existen 03 fases :

- La pieza debe ser magnetizada.
- Las partículas magnéticas del tipo señalado en las especificaciones debe aplicarse mientras la pieza es magnetizada.

- Cualquier acumulación de partículas magnéticas debe ser observada e interpretada.

#### 1) Magnetización de la Pieza

- La superficie de la pieza a examinar deberá estar esencialmente limpia, pudiendo utilizarse detergente o medios mecánicos
- La secuencia de operación del examen por partículas magnéticas, establece la relación tiempo de aplicación y corriente de magnetización.

Las 02 técnicas básicas recomendadas para la magnetización son el método continuo y el método residual.

##### a) Método Continuo

- Las partículas magnéticas, se aplican mientras se mantiene la fuerza magnetizante. Este proceso es utilizado con partículas secas o húmedas.

##### b) Método Residual

- Se utiliza el campo magnético que retiene el material en examen, luego que se interrumpe la fuerza magnetizante. El material a probar debe tener alta retentividad.
-

Si una discontinuidad se orienta paralelamente a las líneas de fuerza, ésta será esencialmente no detectable; por ello desde que una discontinuidad puede presentarse en cualquier dirección, es usualmente necesario magnetizar la pieza en 02 direcciones apropiadas de modo de permitir un adecuado examen.

## 2) Partículas Magnéticas

- Son materiales ferromagnéticos divididos finamente, las cuales han sido tratadas para impartir color, para hacerlos visibles (contraste) en la superficie a examinar.

Hay varios tipos de partículas magnéticas disponibles en la industria, éstos se suministran como polvos secos y polvos concentrados para dispersión en agua o en suspensión en aceite.

## 3) Observación e Interpretación de los Resultados

La acumulación de las partículas magnéticas en los puntos de pérdida de flujo, muestran distorsión del flujo magnético y se denominan INDICACIONES. Cada Indicación observada deberá ser comparada con los criterios de aceptación Standar y las decisiones tomadas, concierne al material que contiene la

indicación.

#### APLICACION DE PARTICULAS MAGNETICAS EN LA REPARACION DE RODETES PELTON

Como método de control no destructivo, en los procesos de reparación de Rodetes Pelton, normalmente, luego de aplicar el líquido penetrante, se aplica el control magnético. Esta prueba se aplica a las zonas críticas de la superficie activa de los álabes.

En el Taller de Campo Armiño, disponemos de 02 equipos de magnetización por puntas. Entre los tipos de partículas magnéticas, se utiliza polvo magnético seco de 150 micras y polvo magnético fluorescente en suspensión en agua, cuyo revelado se hace con una lámpara de luz ultravioleta.

Debido al efecto de la linealidad de las líneas de fuerza al producirse un campo magnético, y con el fin de detectar defectos lineales y/o transversales respecto a la posición de los electrodos o puntas, es recomendable realizar el examen colocando dichos elementos sobre la zona a examinar en dos direcciones perpendiculares entre sí.

Respecto al valor de la corriente de magnetización, en el ensayo sobre los rodetes Pelton de acero inoxidable martensítico, se considera el valor medio de corriente rectificadas y valor eficaz en corriente alterna.

Se recomienda una intensidad de corriente de 70 Amperios/Cm, lo cual es equivalente a realizar el control con electrodos separados entre sí a 20 cm. aplicando una corriente eficaz de 1500 amperios.

La especificación técnica de control por partículas magnéticas, se rigen por las normas CCH 70-2. El capítulo correspondiente a estas pruebas se denomina MT 70-2, lo cual se incluye en el Anexo 8-2. En ella puede observarse los criterios de aceptación según las clases de calidad, siendo recomendable obtener valores máximos hasta de la clase 3.

#### 4.7 VENTAJAS ECONOMICAS

Para una mejor comprensión de las ventajas económicas, que significa el proceso de reparación integral de un rodete Pelton, que se ejecuta en el Taller de Campo Armiño, procedemos a realizar un cálculo de costos de materiales, equipos, personal y otros, como parte de los aspectos logísticos.

Se tomará como ejemplo, los costos en la reparación del rodete No.: 09:53821-1 de la Central Mantaro, considerados al mes de Enero del año 1989.



4.7.1 Costos de Reparación del Rodete Pelton No. 09, Central  
Mantaro

Los costos que se señalan en esta sección, se consideran referidos al mes de ENERO - 1989.

Cambio del Dólar: 1 \$ USA =+I/. 1,400.00

a) Materiales

- Electroodos CITOCHROM 134	2,090 x 5,500	I/.11'495,000
- Piedras de esmeril: A-14 Ø 6x1x1	110 x 4,200	462,000
- Piedras de esmeril: A-20 Ø 81x25x22	50 x 2,000	100,000
- Piedras de esmeril: A-14 Ø 80x1/2	50 x 6,137	306,850
- Piedras de esmeril: A-60 Ø 80x1/2	50 x 6,137	306,850
- Discos de esmeril: Ø 230x1/4	60 x 3,600	216,000
- Discos de esmeril: Ø 180x1/4	25 x 1,892	47,300
- Piedras de esmeril: Ø 1-3/4 x3x1	50 x 3,486	174,300
- Puntas montadas W 230	50 x 700	35,000
- Discos lamerales Ø 6x1x1/2	60 x 6,000	360,000
- Frascos líquido penetrante	70 x 6,000	420,000
		=====
		I/.13'923,300

b) Equipos

- 02 Máquinas de soldar rotativa (5% depreciación). 1'400,000

Se considera precio máquina nueva en \$10,000 y vida útil: 10 años.

- 04 esmeriles neumáticos y 02 esmeriles eléctricos (10% depreciación). 1'176,000

Precio nuevo \$ 1,400. Vida útil: 05 años

- Compresor (2.5% depreciación) 1'400,000

Precio Nuevo \$ 40,000. Vida útil: 10 años  
Trabajo de 04 rodetes en reparación integral/año

- Horno Tratamiento Térmico (0.7% depreciación). 6'860,000

Precio nuevo \$700,000. Vida útil: 20 años  
Trabajo en 07 rodetes/año

- Equipo de Precalentamiento Eléctrico 1'750,000  
(2.5% depreciación)

Precio nuevo \$50,000. Vida útil: 20 años  
Trabajo en 02 rodetes/año.

- Equipos de protección personal y materiales diversos (escobillas de acero, tela de asbesto, fresas, etc.) 3'000,000

=====

I/.15'586,000

c) Personal

- Supervisión : 3'712,500

Tiempo de trabajo : 11 meses, 06 horas  
diarias.

1980 horas-hombre.

Salario : 1875 Intis/hora

- Soldadores (06) : 9'447,840

Trabajo : 4.5 meses, total : 6,480 horas-  
hombre.

Salario : 1,458 Intis/hora

- Esmeriladores (04) : 9'622,800

Trabajo : 5.5 meses, total : 6,600 horas-  
hombre.

Salario : 1,458 Intis/hora.

=====  
I/.22'783,140

d) Energía Eléctrica

- Máquina de soldar: 4.5 meses de soldadura

20 horas/día, total: 2,700 horas

Potencia media : 8 KW; Energía : 21,600

Kw-hora.

- Equipo Pre calentamiento : 4.5 meses, 24

horas/día.

Potencia consumo: 30 KW; Energía: 97,200

Kw-hora.

- Compresor : 5.5 meses, 15 horas/día  
Total: 2475 horas (esmerilado 03 rodetes)  
Horas/rodete : 825  
Potencia media : 60 KW; Energía : 49,500  
Kw-hora.

- Horno Tratamiento :  
Trabajo horno : 40 horas.  
Potencia media : 230 Kw; Energía : 9,200  
Kw-hora.

- Energía Total : 128,000 KW-Hora.

- Precio Kw-hora = 0.04 \$ = 56 Intis.  
(En Mantaro)

Costo Energía Eléctrica : I/. 7'168,000

RESUMEN DE COSTOS :

I) a) Materiales	I/.13'923,300
b) Equipos	15'586,000
c) Personal	22'783,140
d) Energía Eléctrica	7'168,000
	=====
TOTAL	59'460,440
e) Gastos Generales : 10% costo total (Iluminación, limpieza taller, etc.)	5'946,044
- COSTO TOTAL REPARACION RODETE :	I/.65'406,484

#### 4.7.2 Costo de Rodete Pelton Nuevo

De acuerdo a la información proporcionada por el fabricante GEORG FISCHER.

- Costo Rodete Pelton-Central Mantaro :

$$\$ 700,000 = 1/.980'000,000$$

- Relación Costo Reparación/Costo rodete nuevo =

$$\frac{65'406,484}{980'000,000} = 0.067$$

RESUMEN : El costo de reparación es menor al 10% del costo de un rodete nuevo.

#### 4.7.3 Análisis del Cálculo de Costos

De acuerdo a los resultados de los costos obtenidos del proceso de reparación integral del rodeto No. 09 de la Central Mantaro, se observa que el costo de reparación es menor al 10% del costo de un rodete nuevo evaluado en \$ 700,000.00, frente al costo de 25 a 30% que cobra el fabricante, incluyendo transporte, por lo que la justificación económica queda ampliamente demostrada.

También señalamos que con la ejecución de una reparación integral en un tiempo promedio de diez meses, se dispone del Rodete en sitio para la operación en cuatro períodos suce-

sivos de 5,500 horas por período. De este modo se garantiza la confiabilidad de la operación de la Central.

En un período de operación considerando, se produce 500 GW-h de energía eléctrica.

## CAPITULO V

### PLAN DE MANTENIMIENTO INTEGRAL DE LAS TURBINAS

#### 5.1 OBJETIVO

El Plan de Mantenimiento Integral de las Turbinas Pelton comprende un conjunto de actividades relacionadas con el Programa de intervenciones para realizar inspecciones y controles durante paradas de los Grupos, de modo que con estos resultados se permita garantizar la disponibilidad de los equipos para la operación.

En estas inspecciones se cuantifica los niveles de desgaste que se presentan el rodete y componentes del Inyector a fin de detectar desperfectos que podrían poner en riesgo la integridad de los equipos y por lo tanto realizar periódicamente la reparación en sitio o la sustitución de los equipos.

#### 5.2 MODALIDAD DE LAS INTERVENCIONES

Dentro de la modalidad de las intervenciones para llevar a cabo el Plan de Mantenimiento Integral de las Turbinas, se consideran los siguientes :

- Mantenimiento Preventivo.
-

- Mantenimiento General o Intervención Over Haul.

a) Mantenimiento Preventivo :

Se define como un conjunto de inspecciones, controles e intervenciones organizadas en un Programa y que tienen como fin, detectar, corregir condiciones irregulares en el estado de operación de un equipo, que de persistir, podría determinar poner fuera de servicio la máquina.

En los Programas de Mantenimiento Preventivo, se incluyen a los Rodetes Pelton como elemento principal, a los Inyectores y a los Cojinetes que forma parte del sistema Turbina.

b) Mantenimiento General o Over Haul :

En un conjunto de actividades que se desarrollan dentro de un Programa que se refiere en líneas generales a las intervenciones que deben efectuarse periódicamente en los diversos componentes electromecánicos de un Sistema de Generación, con el fin de asegurar un óptimo funcionamiento de la Central Hidroeléctrica.

#### 5.2.1 Mantenimiento de Rodetes Pelton

La metodología del mantenimiento que desarrollamos en el Complejo Hidroeléctrico del Mantaro, está descrita en el Pro-



grama Anual de Mantenimiento Preventivo, en la cual las Turbinas son revisadas e Inspeccionadas periodicamente.

En base al Programa Anual se elabora un Programa Semanal.

En la elaboración del Plan de Mantenimiento se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones :

- Característica de la operación en las épocas de avenida y estiaje durante el año, que se relaciona con el nivel de concentración de sólidos en el río.
- Horas de servicio de los Rodetes.

Considerando los criterios señalados, se han establecido, el siguiente plan de mantenimiento para los rodetes.

A) Rodetes Central Mantaro ;

- Inspección y control con tinte penetrante cada 3.5 Semanas.
- Controlar el estado de las superficies activas, geometría y rugosidad.
- Las fallas ocasionadas por el paso de cuerpos sólidos debe eliminarse con esmeril.

B) Rodetes Central Restitución

- Inspección y control con tinte penetrante cada 06 Semanas.

## 5.2.2 Control de las Ruedas en Servicio

Métodos de control :

### 5.2.2.1 Control visual :

Un control de un rodete Pelton en servicio, no es suficiente, puesto que no se puede ver grietas grandes.

### 5.2.2.2 Control con Líquido Penetrante

Informe de Control :

El resultado de los informes de las ruedas Pelton en servicio hay que fijarlo en una hoja de control; para ello se puede utilizar el impreso adjunto. Ver fig. 17.

### 5.2.2.3 Intervalos de los Controles

- El primer control de los rodetes Pelton nuevas en servicio, así como las reparadas integralmente, debe realizarse, según las condiciones de servicio, después de 500 a 1,000 horas de servicio, para poder corregir a tiempo los posibles defectos de fabricación o reparación, no descubiertos antes. El próximo control debe realizarse después

de 2,000 a 2,500 horas de servicio.

- En general, de acuerdo a las condiciones particulares de una instalación, puede ser necesario controles en intervalos más cortos.
- Debe quedar claramente establecidos que los periodos de inspección de los rodetes, será determinado con la finalidad de conservar el rodete en servicio, evitando la presencia de falla.

### 5.2.3 Mantenimiento de Inyectores

El mantenimiento preventivo del conjunto de los inyectores, está relacionado al desgaste que presentan la boquilla y la punta de aguja; los desgastes en dichas piezas, ocasiona que el chorro de agua, se distorsione y debido a su trayectoria provoca desgaste en los álabes y pérdida en el rendimiento de la turbina.

De acuerdo a pruebas realizadas por los diseñadores, tales efectos pueden alcanzar pérdidas hasta del 4%.

Considerando que las boquillas y agujas de los inyectores de las Turbinas Pelton de la Central Mantaro, son de acero al Cr-Ni, 13/4 y de Stellite, se han establecido, los siguientes criterios para el mantenimiento y reparación de estas piezas.

#### A) Agujas y Boquillas de Acero Cr-Ni 13/4

En este tipo de material referente a las agujas, luego de un período de 15,000 horas de servicio en la Turbina, se tiene un desgaste del orden de 02 mm. en la superficie.

Estas piezas son reparadas con soldadura, de acuerdo a la técnica descrita para el acero 13/4, que se ha tratado en los aspectos de la soldabilidad de Rodetes Pelton. (Capítulo IV).

Actualmente en la Central Mantaro, desde el año de 1985, se viene utilizando únicamente, agujas y boquillas revestidas con material de Stellite, que ofrece mejores características de resistencia a la abrasión.

#### B) Agujas y Boquillas de Stellite

##### Características del Material

La Stellite es una aleación de C, Cr, W y Co, (Carbono, Cromo, Tungsteno y Cobalto) que se utiliza como revestimiento superficial, por tener una alta resistencia a la erosión.

La Stellite, se fabrica generalmente en forma de alambre, para uso como material de aporte por el método axiacetileno, en los diversos grados : 1, 6 y 12 y presentan una dureza Brinell (HB), entre 550-390 Kg/mm .

Por ejemplo la Stellite Grado 1, tiene la siguiente composición química básica : C = 2.5%, Cr = 31%, W = 13% y Co = 50%.

Estas piezas se utilizan en las turbinas de la Central Mantaro y Restitución con las siguientes características de operación :

Agujas y Boquillas de Stellite en Turbinas Central Mantaro

De acuerdo a los controles efectuados durante el mantenimiento preventivo, se ha encontrado un promedio de desgaste de 1.5 mm. para un período de trabajo de 22,000 horas, aproximadamente 04 años, con estos valores de desgaste, se procede a efectuar el cambio respectivo, y luego de su reparación, se utiliza en un segundo ciclo de vida, acumulando un total de 45,000 horas de servicio.

La reparación de estas piezas se realiza con rectificado en torno.

Este trabajo altera ligeramente el ángulo de la aguja (55°), por lo que en el remontaje en los inyectores de la turbina, debe colocarse una plancha metálica en forma de anillo, en el dorso de la boquilla a fin de compensar la alteración señalada.

#### Agujas y Boquillas de Stellite en Turbinas Central Restitución

En los controles del mantenimiento, se han encontrado, en estas piezas un desgaste promedio de 1 mm. en 21,000 horas de servicio, estimándose el cambio de dichas piezas, luego de 30,000 horas de servicio.

Luego de la reparación de estos equipos, se utilizará en un segundo período con un total de 60,000 horas de servicio aproximadamente.

#### 5.2.4 Principales Actividades del Mantenimiento Preventivo

En base a las consideraciones técnicas descritas, a continuación señalamos las principales actividades que se ejecutan en el mantenimiento de las turbinas del Complejo Mantaro :

No.	A C T I V I D A D	Frecuencia Intervención	Tiempo Empleado
1	- TURBINA MANTARO: Inspección	3.5 Semanas	4 horas
	- TURBINA RESTITUCION: "	6.0 Semanas	4 horas
2	- RODETE PELTON: Cambio MANTARO	5,000 horas	04 días
	Cambio RESTITUCION	25,000 horas	03 días
3	- INYECTORES: MANTARO, Cambio de agujas y boquillas	22,000 horas	04 días
	RESTITUCION, bio de agujas y boquillas	30,000 horas	12 días
4	- RODETES PELTON :		
	. Reparación parcial MANTARO	5,000 horas	45 días
	. Reparación parcial RESTITUCION	25,000 horas	70 días
5	- RODETES PELTON :		
	. Reparación integral MANTARO	22,000 horas	10 meses
	. Reparación integral RESTITUCION	66,000 horas	20 meses

### 5.2.5 Mantenimiento General o Over Haul

Este tipo de intervenciones denominados Over Haul, en una Central Hidroeléctrica, se realiza luego de 30,000 horas de operación de un equipo, y consiste en un desmontaje general de todos los componentes para revisión y sustitución de sus partes.

Las intervenciones en los equipos de la Central MANTARO, se iniciarán en el año de 1990, dentro del marco de cooperación técnica con el apoyo del Gobierno Italiano, en el rubro denominado "Mejoramiento del Sistema Mantaro". El programa se refiere en líneas generales a las intervenciones que deben efectuarse periódicamente en los diversos componentes electromecánicos del Sistema de Generación, para asegurar el óptimo funcionamiento de la Central Hidroeléctrica del Mantaro.

Para dicho efecto, se han fijado programas de intervención de los Grupos Alternadores que comprende períodos de trabajo de cinco meses por Grupo Generador.

#### 5.2.5.1 Actividades de Mantenimiento General en Turbina

La revisión completa de las turbinas debe efectuarse aproximadamente cada 30 a 35,000 horas de funcionamiento, correspondiente a un período de operación de 5 a 7 años. Como se observa, estas intervencio-



nes en la Central Mantaro, se realizarán luego de 13 años promedio de operación; siendo estos retrasos motivado por aspectos de carácter logístico.

Los trabajos a efectuarse se encuentran enmarcados en las siguientes actividades :

#### OVER HAUL-GRUPOS 120 MVA

##### 1.- Válvula Esférica :

- Revisión general, cambio de sellos de estanqueidad.
- Cambio de válvulas de toma, compuerta.

##### 2.- Turbina : Inyectores :

- Revisión completa, calibración de tiempos de apertura y cierre..
- Reparación de toberas, cambio de punta de aguja y boquillas.
- Caja Turbina : Mantenimiento general.
- Regulador de Velocidad : Revisión General.

##### 3.- Generador : Desmontaje Rotór :

- Mantenimiento, bobinado rotórico y estatórico.

##### 4.- Cojinetes de Empuje y Guía :

- Sustitución de partes aislantes y revisión general.
-

5.- Transformadores :

- Revisión general, cambio de empaquetaduras.

6.- Equipos :

- 220 KV, Mantenimiento general.

Cabe señalar, respecto a trabajo de las válvulas esféricas, que entre los años de 1983 y 1984; se realizaron, desmontaje y cambio de sellos de estanqueidad, en dichas válvulas de los grupos generadores 1, 2, 3, y 4 de la Central Mantaro.

## CONCLUSIONES

1. Debido a la cantidad de sólidos contenida en el agua es necesario establecer para los Rodetes Pelton de la Central Mantaro, períodos de operación de :

- 5,500 Horas para reparación parcial.
- 22,000 Horas para reparación integral.

2. En el Complejo Hidroeléctrico del Mantaro, se dispone actualmente de una tecnología propia para la reparación integral de los Rodetes Pelton de las Centrales Mantaro y Restitución, con lo cual se garantiza la confiabilidad de operación de las Turbinas.

Esta tecnología ha sido captada del apoyo técnico del proyectista y del fabricante de rodetes; y se desarrolla siguiendo recomendaciones técnicas especializadas.

3. Cumpliendo el programa de reparaciones integrales de los rodetes, propuesto, que implica ejecutar 2.5 reparaciones al año, garantizamos la operación permanente de las Turbinas, y la compra de un rodete para la Central Mantaro, será necesario dentro de ocho años para sustituir al primer rodete que cumpla su vida útil.

---

4. El costo de la reparación integral de un rodete Pelton de la Central Mantaro, es menor al 10% del costo de un rodete nuevo, evaluado en U.S.A \$ 700,000, frente al costo de 25 a 30% que cobra el fabricante por dicho trabajo, lo cual constituye una ventaja económica.

Esta reparación en el Taller de Campo Armiño, en el tiempo de 10 meses, comparativamente con el tiempo de reparación en el exterior de 18 meses, permite disponer del rodete para un período de operación de 5,500 horas, con una producción de 500 GW- hora de energía eléctrica.

5. La tecnología de reparaciones descrita en el presente trabajo, puede ser aplicado en otras Centrales Hidroeléctricas con Turbinas Pelton en el país.
-

## BIBLIOGRAFIA

1. WELDABILITY OF HIGH TENSILE MANTENSITIC CAST STEEL WITH 13% Cr AND 4% Ni.  
W.Gysel, Georg Fischer-Information Cast Steel 1970
2. FATIGUE LIMIT AND FRACTURE MECHANIC OF CAST STEEL FOR WATER TURBINES.  
F. Mahning, A. Rist, H. Walter-Georg Fischer Information Cast Steel 1974.
3. USURE E RIPARAZIONI DELLE TURBINE IDRAULICHE.  
Eduardo Bartolozzi.
4. LE MODERNE TURBINE IDRAULICHE. ED I REGOLATORI DI VELOCITA  
Giacomo Buchi-Editorial Hoepli-Milán.
5. METALURGIA DE LA SOLDADURA.  
Daniel Seferian.
6. LA SALDATURA.  
Istituto Italiano Della Saldatura-Génova.
7. MANUAL DE SOLDADURA OERLIKON - IV Edición.
8. NORMAS ASTM.E - 165 : STANDARD RECOMENDE PRACTICE FOR LIQUID PENETRANT INSPECTJON METHOD.
9. NORMAS ASTM-E-709 : STANDARD RECOMENDE PRACTICE FOR MAGNETIC PARTICLE EXAMINATION.
10. CAHJER DES CHARGES DE RECEPTJON DES PIECES EN ACJER MUOLE POUR MACHINES HYDRAULIQUES - CCH 70-2.  
Edición 2-1979
11. INSPECTJON PERIODS FOR PELTON RUNNERS.  
H. Grein, R. Angehrn, M. Lorenz y A. Bezinge  
Water Power - Construction, + Feb. 1985