

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

**Elaboración de matriz de estrategia de mantenimiento proactivo
referente a rodetes de turbina Pelton de la central hidroeléctrica
El Toro**

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero de Ejecución en Mantenimiento
Industrial

Alumno:

Thomas Andrés Sagredo Placencio

Profesor Guía:

Ing. Luis Gutiérrez Meneses

2024

RESUMEN

Este trabajo de titulación se centra en el desarrollo y validación de un método de análisis microestructural mediante réplicas metalográficas para evaluar la condición de los rodets de las turbinas Pelton. El objetivo principal es implementar una estrategia de mantenimiento proactivo destinada a reducir el impacto económico de las fallas no programadas en la central hidroeléctrica El Toro. En el contexto inicial, se destaca la importancia crítica de las turbinas tipo Pelton en la generación de energía hidroeléctrica. Se detallan los principios de la réplica metalográfica y el análisis de dureza mediante ultrasonido, haciendo especial énfasis en los estándares normativos SA-487 y SA-743 utilizados para evaluar la calidad del material inoxidable martensítico CA6NM. Se describe la metodología empleada, que incluye la preparación del sitio, la medición de dureza en puntos críticos y la obtención de réplicas metalográficas. Se realiza una matriz donde evaluamos los parámetros críticos para el material base de un rodete Pelton. Se analizan detalladamente las microestructuras, así como la identificación de defectos como microgrietas y piletas de ferrita, proporcionando una evaluación exhaustiva del estado de los rodets. Finalmente, se propone un enfoque económico basado en la estrategia de mantenimiento proactivo, validado mediante un análisis comparativo de costos. Este enfoque no solo mejora la gestión de activos críticos, sino que también representa una contribución significativa al campo del mantenimiento industrial en términos de eficiencia operativa y mitigación de riesgos.

INDICE

RESUMEN	2
INDICE.....	3
INDICE DE FIGURAS	5
INDICE DE TABLAS.....	6
SIGLA Y SIMBOLOGÍA	7
INTRODUCCIÓN.....	9
PROBLEMÁTICA	10
OBJETIVOS.....	11
1. Capítulo 1: Importancia de la Turbina Pelton.	12
1-1. Central hidroeléctrica El Toro	13
1-2. Importancia de la turbina tipo Pelton	14
1-2-1. Turbina tipo Pelton	14
1-2-2. Turbina Pelton, subsistemas y elementos esenciales.....	16
1-2-3. Ventajas turbina Pelton.....	25
1-3. Fallas tradicionales en turbinas tipo Pelton	26
2. Capítulo 2: Jerarquización modos de fallos.	30
2-1. Priorización de los modos de fallos en base al riesgo total anualizado (RTA).....	31
2-2. Ensayos no destructivos (END).....	35
2-3. Selección réplica metalográfica como técnica de análisis.....	37
2-4. Réplicas metalográficas.....	38
2-4-1. Parámetros generales para producción y evaluación de replicas metalográficas	39
3- Capítulo 3: Elaboración de una matriz de estrategia de mantenimiento proactivo.	42
3.1- Metodología de análisis basado en la condición de los rodets	43
3.2- Mediciones de dureza macro HB (UCI)	44
3.3- Análisis microestructural.....	46
3-3-1 Rodete número 1.....	47
3-3-2 Rodete número 2.....	48
3-3-3 Rodete número 3.....	49
3-3-4 Rodete número 4.....	51

3.5- Elaboración de una matriz de estrategia de mantenimiento proactivo referente a rodetes de turbina Pelton.....	52
3.5.1- Selección de los parámetros críticos para el material base de un rodete Pelton .	52
3.5.2- Análisis de los parámetros críticos para el material base de un rodete Pelton	53
3.6- Recomendaciones de mantenimiento	55
3-6-1. Procedimiento de soldadura por método de recapado	56
3-6-2 Tratamiento térmico de reacondicionamiento	58
3.7- Validación estrategia económica	60
CONCLUSIÓN	64
BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXOS	67

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Montaje de un rodete tipo Pelton.	10
Figura 1-1. La laguna del Laja.	13
Figura 1-2. Detalle cazoleta.	15
Figura 1-3. Rodete Pelton.	17
Figura 1-4. Inyector.	18
Figura 1-5. Válvula de admisión.	19
Figura 1-6. Cojinetes.	20
Figura 1-7. Regulador de velocidad.	21
Figura 1-8. Rotor.	22
Figura 1-9. Estator.	23
Figura 1-10. Rodamiento.	25
Figura 2-1. Secuencia de obtención de la réplica.	39
Figura 2-2. Etapas obtención replica metalográfica	40
Figura 3-1. Lugar donde se realizaron los ensayos	44
Figura 3-2. Réplica metalográfica rodete 1	48
Figura 3-3. Réplica metalográfica rodete 2	49
Figura 3-4. Réplica metalográfica rodete 3	50
Figura 3-5. Réplica metalográfica rodete 4	51
Figura 3-6. Procedimiento de soldadura WPS	57
Figura 3-7. Procedimiento de soldadura WPS (2).....	58
Figura 3-8. Gráfico comparativo estrategias económicas.	62

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Datos técnicos turbina Pelton.....	16
Tabla 1-2. Función del rodete y sus elementos.	16
Tabla 1-3. Función del inyector y sus elementos.	17
Tabla 1-4. Función de la válvula de admisión y sus elementos.	19
Tabla 1-5. Función del Cojinete y sus elementos.....	20
Tabla 1-6. Función del regulador de velocidad y sus elementos.....	21
Tabla 1-7. Función del rotor y sus elementos.....	22
Tabla 1-8. Función del estator y sus elementos.....	23
Tabla 1-9. Función de los rodamientos y sus elementos.	24
Tabla 1-10. Fallas tradicionales en turbina Pelton.	26
Tabla 2-2. Cálculo del CAR.....	32
Tabla 2-3. Cálculo PE.....	33
Tabla 2-4. PAF.	34
Tabla 2-5. Jerarquización de los modos de fallo	34
Tabla 2-6. Ensayos no destructivos.	36
Tabla 2-7. Selección END.	38
Tabla 3-1. Tabla mediciones de dureza rodete 1	45
Tabla 3-2. Tabla mediciones de dureza rodete 2	45
Tabla 3-3. Tabla mediciones de dureza rodete 3.....	46
Tabla 3-4. Tabla mediciones de dureza rodete 4.....	46
Tabla 3-5. Matriz de análisis de los parámetros críticos para rodete Pelton central El Toro	53
Tabla 3-6. Matriz de análisis parámetros críticos para el material CA6NM.....	54
Tabla 3-7. Costos estrategia 1.....	60
Tabla 3-8. Costos estrategia 2.....	61
Tabla 3-9. Costos estrategia 3.....	62

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

SEN: Sistema Eléctrico Nacional.

ASMAR: Astilleros y Maestranzas de la Armada.

END: ensayo no destructivo.

Rpm: revoluciones por minuto.

ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales).

AWS: American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadura).

ASME: Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.

WPS: Welding Procedure Specification (Especificación del procedimiento de soldadura)

B. SIMBOLOGIA

°C: grado Celsius.

km²: kilómetro cuadrado.

m³: metro cúbico.

MW: megavatio.

m³/s: metro cubico/segundo.

kW: kilovatio.

m: metro.

mm: milímetro.

μm : micrómetro.

%: porcentaje.

US\$: dólares.

INTRODUCCIÓN

La energía hidroeléctrica es una de las fuentes de generación de energía renovable más usadas en Chile, correspondiente al 23,1% de la capacidad total instalada (Generadoras de Chile, 2021), en esta categoría las turbinas tipo Pelton son las más utilizados. Este proceso de transformar la energía cinética del agua en energía mecánica lo lleva a cabo el elemento denominado rodete, mediante el impacto del agua en una parte de este llamado cangilón o cuchara. Los cangilones al estar en constante interacción con el impacto del agua son sometidos a múltiples fuentes de desgaste como lo son el desgaste, fatiga y deformaciones plásticas por mencionar algunas (Briceño, Escobar, & Ramírez, 2008).

En el contexto de la industria de generación de energía hidroeléctrica, la fiabilidad y el rendimiento de los activos son cruciales para garantizar la operatividad continua y la eficiencia de las centrales eléctricas. En el ámbito del mantenimiento industrial, la gestión eficaz de activos críticos como lo son los rodetes de las turbinas tipo Pelton es fundamental para prevenir fallas catastróficas y costosas. Muchos de los desperfectos están asociadas a las condiciones operativas, actualmente según un análisis realizado en base al libro Técnicas de Análisis Causa Raíz (Carlos Parra y Adolfo Crespo, 2021) en costos vinculados a desperfectos en las cucharas del rodete Pelton se han invertido US\$214.576.000 en el año 2023 en la central El Toro. Este trabajo se enfoca en la aplicación de técnicas avanzadas de análisis microestructural, específicamente la replicación metalográfica, que ayudará a: evaluar de manera precisa y detallada la condición actual de los rodetes, tomar decisiones sobre su mantenimiento y recuperación. El objetivo principal es desarrollar y validar un método integral que permita no solo caracterizar la condición actual de los rodetes, sino también establecer una estrategia proactiva de mantenimiento basada en la condición, reduciendo así el impacto económico de las fallas no programadas, minimizando los costos asociados a paradas no planificadas y reparaciones extensivas.

PROBLEMÁTICA

La central hidroeléctrica “El Toro” está ubicada en la provincia de Ñuble, representa el 50% de la potencia instalada en el sistema del río Laja y el 23% de la potencia total instalada para servicio público en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Desde hace un tiempo tiene problemas con el funcionamiento de sus turbinas tipo Pelton, activo primordial para su proceso productivo, los cuales detienen su proceso y elevan los costos de indisponibilidad. Actualmente la empresa busca mitigar los costos asociados a las paradas no programadas del equipo, paradas ocasionadas por fallos de fisuras o grietas, o desgaste de los rodetes pertenecientes a las turbinas Pelton. Además, el hecho de contar solo con un plan de mantenimiento correctivo ha llevado a paradas no programadas y a elevados costos en mantención. (US\$214.576.000 en el año 2023).

Figura 1. Montaje de un rodete tipo Pelton.



Fuente: Fuente: ENDESA (1995). Manual de la Central Hidroeléctrica El Toro

En la figura 1, se observa el montaje de un rodete tipo Pelton.

OBJETIVOS

Objetivo general

Verificar la condición actual del material del rodete de las turbinas tipo Pelton de la central hidroeléctrica El Toro, mediante la elaboración de una matriz de estrategia de mantenimiento proactivo utilizando la técnica réplica metalográfica. Esto determinará la estrategia de mantenimiento y los parámetros de reparación ante posibles hallazgos encontrados durante la inspección.

Objetivos específicos

- 1- Reconocer la importancia de la Turbina Pelton dentro del proceso productivo de la central hidroeléctrica El Toro, según su funcionalidad e indicando sus fallas tradicionales.
- 2- Categorización de los modos de fallos de acuerdo con el “Riesgo Total Anualizado”, estableciendo la técnica de análisis a utilizar.
- 3- Elaboración de una matriz de estrategia de mantenimiento proactivo referente a rodetes de turbina Pelton, para finalmente eliminar el impacto económico de fallas no programadas.

1. Capítulo 1: Importancia de la Turbina Pelton.

Capítulo 1: Importancia de la Turbina Pelton.

1-1. Central hidroeléctrica El Toro

Chile tiene una gran cantidad de recursos hídricos, el país tiene una longitud de costa de más de 4.000 kilómetros y una gran cantidad de ríos. Estos recursos hídricos son ideales para la generación hidroeléctrica.

La central El Toro ubicada en la provincia de Ñuble, 80 kilómetros al este de la ciudad de los Ángeles y 10 kilómetros al norte de la Central Abanico actualmente en funcionamiento. La central El Toro es un elemento fundamental en el aprovechamiento hidroeléctrico del río Laja. Dicho aprovechamiento consiste en la utilización con fines energéticos de los caudales provenientes de la hoya hidrográfica del lago Laja. El lago Laja es un inmenso embalse natural originado por las sucesivas erupciones de los volcanes Laja y Antuco que represaron las aguas del río Laja. Recibe los aportes de una hoya hidrográfica de 975 km² de superficie y puede almacenar un volumen de agua de cerca de 8.000 millones de m³.

El Sistema hidroeléctrico del río Laja es un componente fundamental del esquema eléctrico de Chile. La central El Toro, de 400 MW, representa el 50% de la potencia instalada en el sistema del río Laja y el 23% de la potencia total instalada para servicio público en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). La importancia de la central El Toro se ve reforzada por el enorme volumen de regulación del lago Laja (figura 1-1.), que es cuatro veces superior al de las demás centrales hidroeléctricas del SEN. Esto garantiza la entrega de energía de forma segura, independientemente de las condiciones meteorológicas.

Figura 1-1. La laguna del Laja.



Fuente: Arnaboldi, T. (2016, 11 agosto). ¿Qué le hemos hecho al Laja?

1-2. Importancia de la turbina tipo Pelton

1-2-1. Turbina tipo Pelton

La turbina tipo Pelton fue inventada por el ingeniero estadounidense Lester Allan Pelton en 1879, quien la patentó un año después. En las centrales hidroeléctricas, la turbina juega un papel fundamental, estas máquinas transforman la energía cinética de traslación, obtenida desde la toma de agua del embalse, en energía mecánica.

Se reconocen tres tipos principales de turbinas: de impulsión (o Pelton), de reacción (o Francis) y de propulsión (o Kaplan). La turbina tipo Pelton se utiliza en saltos de agua de gran altura superiores a 200 metros y con caudales pequeños de agua de hasta 10 m³/s. La turbina Francis se utiliza en saltos de altura intermedia hasta los 200 metros y con caudales muy variados de agua, entre 2 y m³/s, además esta turbina se puede utilizar en un gran rango de saltos y caudales de agua lo que la hace la más versátil. La turbina Kaplan se utiliza en saltos de pequeña altura de agua de hasta 50 metros y con caudales que suelen superar los 15 m³/s, para mucho caudal de agua a poca altura esta turbina es la mejor opción

La eficiencia de las turbinas Pelton se desarrolla a través de la redirección del flujo de agua en la cazoleta (figura 1-2), su forma se asemeja a la concavidad de una cuchara doble, y su función principal es recibir el chorro de agua proveniente de los inyectores, cuando el chorro de agua impacta la cazoleta, se produce un cambio brusco

en la dirección del flujo. Este cambio direccional, a menudo cercano a los 180 grados, facilita la transferencia de la energía cinética del agua al rodete.

Figura 1-2. Detalle cazoleta.



Fuente: Francisco Vela (2018, 30 agosto). Turbina Pelton.

En la figura 1-2. Se visualiza la forma de la cazoleta de la turbina que se asemeja a la concavidad de una cuchara doble.

De esta forma la turbina Pelton maximiza la captura de energía en el rodete, generando un par mecánico que se aprovecha en el eje del rodete. El uso de inyectoros múltiples en las unidades verticales contribuye a reducir las pérdidas debido al juego (tolerancia) del rodete. La turbina Pelton consta de varios subsistemas y elementos esenciales. Estos componentes trabajan en conjunto para convertir la energía hidráulica en energía mecánica y, finalmente, en energía eléctrica.

En la Central El Toro, se emplean cuatro turbinas tipo Pelton de eje vertical, con un rodete compuesto por un corredor de 22 cucharas, alimentado por 6 inyectoros. Diseñada para aprovechar el significativo salto de altura de 540 metros. El túnel de aducción tiene una longitud de 9050 metros y es de hormigón. Las aguas se toman 70 metros bajo el nivel máximo del lago. Es la primera central con casa de máquinas subterránea en el país, las válvulas y equipo de accesorios están situados en una caverna subterránea. A continuación, la tabla 1-1. muestra los datos técnicos de la turbina.

Tabla 1-1. Datos técnicos turbina Pelton.

Denominación	Dato técnico
Tipo	Pelton eje vertical
Caída neta media (m)	540
Caudal máximo (m ³ /s)	97
Potencia máxima para nivel mínimo de lago (MW)	400
Velocidad de rotación (RPM)	333,33
Velocidad de embalamiento (RPM)	629,33
Sentido de rotación	Horario para un observador que mire desde lo alto
Material de rodete	ASTM SA 487 CA6NM
Numero de inyectores	6 por cada rodete
Numero de turbinas Pelton en la central	4
Fabricantes	CHARMILLES, Suiza

Fuente: ENDESA (1995). Manual de la Central Hidroeléctrica El Toro

1-2-2. Turbina Pelton, subsistemas y elementos esenciales

La turbina Pelton consta de varios subsistemas y elementos esenciales los cuales tienen diferentes funciones que se mencionan en las tablas expuestas a continuación. Estos componentes trabajan en conjunto para convertir la energía hidráulica en energía mecánica y, finalmente, en energía eléctrica.

En la siguiente tabla 1-2. Se describe la función del rodete de la turbina (figura 1-3.), y también sus elementos (cucharas, eje del rodete, espárragos).

Tabla 1-2. Función del rodete y sus elementos.

Función del Rodete

Convierte la energía cinética del agua en energía mecánica. Está equipado con álabes en forma de cucharas dobles que capturan la energía del chorro de agua proveniente del inyector.	
Elementos	Función
Cucharas	Es el elemento que recibe el golpe del chorro de agua en sus 22 alabes
Eje del rodete	Encargado de soportar el peso y la carga del rodete
Espárragos	Elementos de sujeción

Fuente: Ulises Quispe Yale (2018). Análisis de fallas funcionales del sistema turbina-generador.

Figura 1-3. Rodete Pelton.



Fuente: central El Toro (2023), informe técnico ASMAR.

En la figura 1-3. Se muestra el rodete de la turbina Pelton analizado en la central hidroeléctrica El Toro.

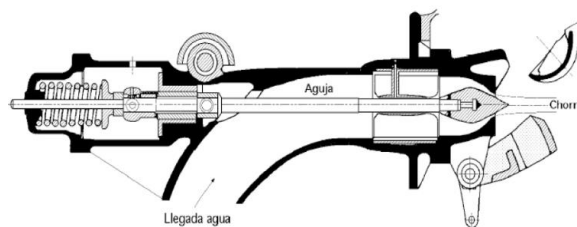
En la siguiente tabla 1-3. Se describe la función del inyector (figura 1-4.), y también sus elementos (aguja, vástago, tobera, asiento de tobera, resorte y tuerca de calibración).

Tabla 1-3. Función del inyector y sus elementos.

Función del Inyector	
Son dispositivos que dirigen el chorro de agua hacia los álabes del rodete. El chorro a su salida debe ser lo más estable y perfecto posible ya que cualquier deformación incidirá notablemente en el desgaste de las cucharas por efecto de la cavitación	
Elementos	Función
Aguja	La aguja es el elemento que regula el caudal de agua que fluye a través de la tobera. Su función es controlar la potencia generada por la turbina
Vástago	Soporte y eje de la aguja
Tobera	Encargado de direccionar el chorro de agua
Asiento de tobera	Mantiene la hermeticidad del cierre de la aguja, sirve de soporte de la tobera
Resorte	Mantener cerrado al inyector cuando el grupo sale del sistema
Tuerca de calibración	Encargado de la calibración del cierre y apertura del inyector.

Fuente: Ulises Quispe Yale (2018). Análisis de fallas funcionales del sistema turbina-generator.

Figura 1-4. Inyector.



Fuente: Francisco Vela (2018, 30 agosto). Turbina Pelton

En la figura 1-4. Se muestra el lugar por donde ingresa el agua al inyector de la turbina, la aguja que regula el caudal del chorro y la salida del chorro.

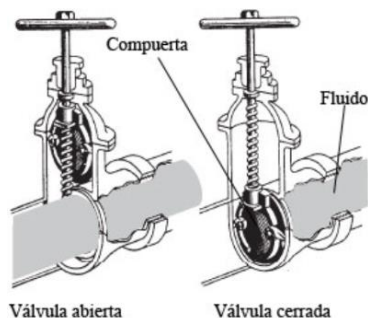
En la siguiente tabla 1-4. Se describe la función de la válvula de admisión (figura 1-5.), y también sus elementos (volante, vástago, compuerta y casquillo).

Tabla 1-4. Función de la válvula de admisión y sus elementos.

Función de la Válvula de admisión	
Encargado del cierre o apertura del caudal que ingresa de la tubería de presión hacia la turbina Pelton	
Elementos	Función
Volante	Elemento de manipulación para el giro horario o antihorario de apertura o cierre
Vástago	Elemento que se desplaza verticalmente para levantar o bajar la compuerta
Compuerta	Encargado de sellar la válvula de admisión, impidiendo el ingreso de caudal
Casquillo	Elemento fijo por donde el vástago puede ascender o descender libremente

Fuente: Ulises Quispe Yale (2018). Análisis de fallas funcionales del sistema turbina-generador.

Figura 1-5. Válvula de admisión.



Fuente: Francisco Vela (2018, 30 agosto). Turbina Pelton

En la figura 1-5. Se muestra la válvula de admisión de la turbina Pelton, al lado izquierdo cuando la válvula se encuentra abierta y al lado izquierdo la válvula cerrada.

En la siguiente tabla 1-5. Se describe la función del cojinete (figura 1-6.), y también sus elementos (anillo de lubricación, cojinete de la parte superior, cojinete de la parte inferior, contenedor de aceite y tapa de cojinete).

Tabla 1-5. Función del Cojinete y sus elementos.

Función del cojinete	
Encargado del soporte y que el eje del sistema turbina-generador gire normalmente con mínimas fricciones.	
Elementos	Función
Anillo de lubricación	Encargado de lubricar el cojinete y también el eje del sistema turbina-generador
Cojinete parte superior	Cubrir la parte superior del eje del sistema turbina-generador, evitar la fricción seca con ayuda del aceite de lubricación
Cojinete parte inferior	Soportar el eje del sistema turbina generador, evitar la fricción seca con ayuda del aceite de Lubricación
Contenedor de aceite (parte inferior)	Encargado de contener el aceite de lubricación
Tapa de cojinete (parte superior)	Cubrir parte superior exterior

Fuente: Ulises Quispe Yale (2018). Análisis de fallas funcionales del sistema turbina-generador.

Figura 1-6. Cojinetes.



Fuente: Angel Toapanta (2008). Rehabilitación de cojinetes de turbina Pelton.

En la figura 1-6. Se muestran diversos cojinetes utilizados en las turbinas tipo Pelton.

En la siguiente tabla 1-6. Se describe la función del regulador de velocidad (figura 1-7.), y también sus elementos (servomotor, bomba forzada de engranajes, mecanismo detector de velocidad, válvula de control, mecanismo de regulación manual, cárter, mecanismo de limitador de carga y mecanismo de regulador de carga).

Tabla 1-6. Función del regulador de velocidad y sus elementos.

Función del Regulador de Velocidad	
Regula la velocidad en relación con el caudal que ingresa a la turbina Pelton	
Elementos	Función
Servomotor	Regula el aceite a presión para transformarlo en movimiento mecánico rectilíneo
Bomba forzada de engranajes	Es el encargado de la provisión de aceite a presión
Mecanismo detector de velocidad	Encargado de detectar variaciones de velocidad
Válvula de control	Válvula encargada de distribuir y controlar el caudal de aceite a presión
Mecanismo de regulación manual	Elementos de regulación de forma manual
Cárter	Suministro de aceite de trabajo
Mecanismo de limitador de carga	Encargado de limitar a una carga requerida
Mecanismo de regulador de carga	Encargados de regular la carga de acuerdo con las variaciones de dicha carga

Fuente: Ulises Quispe Yale (2018). Análisis de fallas funcionales del sistema turbina-generador.

Figura 1-7. Regulador de velocidad.



Fuente: Ulises Quispe Yale (2018). Análisis de fallas funcionales del sistema turbina-generador.

En la figura 1-7. Se muestra el regulador de velocidad de la turbina Pelton.

En la siguiente tabla 1-7. Se describe la función del rotor (figura 1-8.) y también de sus elementos (polos, devanado de campo, eje).

Tabla 1-7. Función del rotor y sus elementos.

Función del Rotor	
Parte rotativa que establece constante un campo magnético por medio de una corriente continua	
Elementos	Función
Polos	Conducir el campo magnético
Enrollamiento o devanado de campo	Producir campo magnético constante, son enrollados en los polos.
Eje	Transfiere la potencia mecánica de la turbina Pelton hacia el generador en forma de movimiento y torque.

Fuente: Ulises Quispe Yale (2018). Análisis de fallas funcionales del sistema turbina-generador.

Figura 1-8. Rotor.



Fuente: Oswos (2023). Motor sincrónico.

En la siguiente figura 1-8. Se muestra el rotor de un motor sincrónico.

En la siguiente tabla 1-8. Se describe la función del estator (figura 1-9.) y también de sus elementos (carcasa, devanado estator, bornes de conexión).

Tabla 1-8. Función del estator y sus elementos.

Función del Estator	
Actuar como contenedor del rotor y crear un campo magnético que interactúa con el campo magnético del rotor para generar fuerza y hacer girar el eje.	
Elementos	Función
Carcasa	Cubrir el conjunto de enrollamientos
Enrollamiento o devanado del estator	Circular la energía eléctrica alterna generada a volate elevado
Bornes de conexión del generador	Conectar el generador (tipo de conexión estrella) con la salida de cables por donde se transporta la corriente eléctrica generada

Fuente: Ulises Quispe Yale (2018). Análisis de fallas funcionales del sistema turbina-generador.

Figura 1-9. Estator.



Fuente: Oswos (2023). Motor sincrónico.

En la figura 1-9. Se muestra el estator de un motor sincrónico.

En la siguiente tabla 1-9. Se describe la función de los rodamientos y también de sus elementos (elemento rodante, jaula, anillo exterior, anillo interior).

Tabla 1-9. Función de los rodamientos y sus elementos.

Función de los rodamientos	
Reducir la fricción del eje en movimiento, apoyo y soporte de cargas expuestas.	
Elementos	Función
Elemento rodante	Elementos encargados de rotar sobre el anillo interior y exterior
Jaula o rejilla	Retención y fijación de los elementos rodantes
Anillo exterior	Elemento de apoyo fijo en la carcasa del generador
Anillo interior	Elemento de apoyo fijo en la carcasa del generador

Fuente: Ulises Quispe Yale (2018). Análisis de fallas funcionales del sistema turbina-generador.

Figura 1-10. Rodamiento.



Fuente: Canyon hydro (2023). Sistema de turbinas hidroeléctricas.

En la figura 1-10. Se muestra el rodamiento acoplado al eje de la turbina.

Cada uno de estos componentes trabaja en conjunto para convertir la energía hidráulica del agua en electricidad de manera eficiente.

1-2-3. Ventajas turbina Pelton

La turbina Pelton presenta varias ventajas distintivas en comparación con otras turbinas utilizadas. A continuación, se describen algunas de las ventajas según los autores Johel Benites (2014) y Edison Alcoser (2018):

- Alta eficiencia en altas caídas: La turbina Pelton es especialmente eficiente en sitios donde hay una caída significativa de agua. Su diseño permite aprovechar eficazmente la energía cinética del agua en estas condiciones.
- Adaptabilidad a variaciones de caudal: La turbina Pelton puede adaptarse a variaciones en el caudal de agua. Su diseño y capacidad para operar con eficiencia en

una amplia gama de caudales la hacen versátil y adecuada para entornos con fluctuaciones en el flujo de agua.

- Bajo mantenimiento: En comparación con algunas otras turbinas, la turbina Pelton a menudo requiere un mantenimiento relativamente bajo. Su diseño simple y robusto contribuye a una mayor confiabilidad operativa.
- Menos sensible a la calidad del agua: La turbina Pelton es menos sensible a la calidad del agua en comparación con algunas otras turbinas. Puede funcionar eficientemente incluso en presencia de sedimentos en el agua.
- Mayor vida útil: Con el mantenimiento adecuado, las turbinas Pelton tienen una vida útil prolongada. Su diseño resistente y la capacidad de adaptarse a diversas condiciones contribuyen a una durabilidad superior.

Es importante destacar que la elección de la turbina depende de las características específicas de cada proyecto, factores como la altura de la caída, el caudal, y las condiciones del sitio influyen en la selección de la turbina más adecuada.

1-3. Fallas tradicionales en turbinas tipo Pelton

Sabiendo que el contexto operacional es uno de los más importantes dentro del mantenimiento industrial, las limitaciones de este trabajo fue temas teóricos en base a lectura de los siguientes autores mencionados en la tabla 1-10. Los cuales han caracterizado las fallas principales, siendo estas: desgaste, cavitación y fatiga de material. En la siguiente tabla se describen las fallas tradicionales en una turbina Pelton y sus consecuencias.

Tabla 1-10. Fallas tradicionales en turbina Pelton.

Causa de falla	Descripción	Consecuencias	Autor
----------------	-------------	---------------	-------

Desgaste	La exposición continua al flujo de agua a alta velocidad puede causar desgaste en los álabes del rodete y en las superficies internas de la cazoleta.	Disminución de la eficiencia, pérdida de rendimiento y posible mal funcionamiento.	Chávez, JC, Valencia, JA, Jaramillo, GA, Coronado, JJ, & Rodríguez, SA (2015). Egusquiza, M., Egusquiza, E., Valentín, D., Valero, C. y Presas, A. (2017 y 2018). Dorji, U. y Ghomashchi, R. (2014). Rossetti, A., Pavesi, G., Ardizzon, G., & Santolin, A. (2014).
Cavitación	La cavitación ocurre cuando burbujas de vapor se forman y colapsan en áreas de alta presión, generando impactos en las superficies metálicas.	Erosión por cavitación, daño en los álabes y en las superficies internas.	Chávez, JC, Valencia, JA, Jaramillo, GA, Coronado, JJ, & Rodríguez, SA (2015). Egusquiza, M., Egusquiza, E., Valentín, D., Valero, C. y Presas, A. (2017 y 2018). Dorji, U. y Ghomashchi, R. (2014).
Fatiga de materiales	Ciclos repetitivos de carga y descarga pueden causar fatiga en los materiales, especialmente en áreas críticas como soldaduras.	Grietas por fatiga, posibles fracturas.	Egusquiza, M., Egusquiza, E., Valentín, D., Valero, C. y Presas, A. (2017 y 2018). Dorji, U. y Ghomashchi, R. (2014). Dulal, H., Dura, HB y Poudel, L. (2021). Li, J.-Q., Myat, M., & Saw, M. (2017).
Corrosión	La exposición a ambientes corrosivos, especialmente en instalaciones en entornos marinos, puede	Pérdida de material, debilitamiento estructural.	Maurizio Edwards Ackroyd (2024).

	provocar corrosión en componentes metálicos.		
Desbalanceo	Puede ser causado por la erosión de los álabes, la acumulación de depósitos, defectos en la fundición o la instalación incorrecta de componentes.	Desgaste prematuro e irregular, vibraciones y aumento de ruido, posibles daños estructurales con riesgo de rotura, pérdida de eficiencia, inestabilidad en la operación.	Maurizio Edwards Ackroyd (2024).
Baja dureza	Más propensos a sufrir desgaste, mayor susceptibilidad a la deformación plástica, menor resistencia al impacto.	Desgaste acelerado, fatiga que puede llevar a la fractura. Pérdida de eficiencia y riesgo de falla catastrófica, lo que puede causar daños a la turbina y poner en peligro la seguridad del personal.	Maurizio Edwards Ackroyd (2024).
Sedimentos en el agua	Se evidencia presencia de desgaste por acción de sedimentos en el agua.	Perdida del perfil hidráulico por acción del sedimento sobre las superficies activas.	Maurizio Edwards Ackroyd (2024).
Excesivo aporte calórico	Definición inadecuada de los parámetros eléctricos significativos, tensión, corriente, eficiencia del proceso y velocidad de avance.	Fragilización en caliente, crecimiento del tamaño de grano, disminución de resistencia, dureza y tenacidad.	Maurizio Edwards Ackroyd (2024).
Baja resistencia	Alto nivel de desgaste y geometría inadecuada	Perdida de resistencia por pérdida geométrica	Maurizio Edwards Ackroyd (2024).

	producto de múltiples reparaciones.	asociada al proceso de desgaste existente.	
Crecimiento tamaño de grano	Efecto térmico sobre el rodete cada vez que fue sujeto a reparación reconstructiva por soldadura y posterior tratamiento.	Disminución de la resistencia, tenacidad y dureza.	Maurizio Edwards Ackroyd (2024).

Fuente: Elaboración propia (2024). Fallas tradicionales turbina tipo Pelton.

La combinación de factores ambientales, operativos y de diseño puede contribuir a la ocurrencia de fallas en las turbinas Pelton.

2. Capítulo 2: Jerarquización modos de fallos.

Capítulo 2: Jerarquización modos de fallos y selección de réplica metalográfica.

2-1. Priorización de los modos de fallos en base al riesgo total anualizado (RTA)

Según el libro “Técnicas de Análisis Causa Raíz (ACR)”, una vez identificados los modos de fallos, se procede a definir el nivel de criticidad de estos. Se describe “el impacto y las consecuencias del evento de fallo sobre el ambiente, las personas y las operaciones (pérdidas económicas). Se propone cuantificar económicamente el impacto promedio del evento en función del Riesgo (unidad monetaria/tiempo = dólares/año, euros/año, etc.). A continuación, se presenta la expresión para cuantificar el Riesgo (R) por evento”. (Parra, 2000):

$$RTA = CAR + PAF$$

Dónde:

- CAR: costes anuales de reparación (US\$/año)
- PAF: penalización anual por fallos (US\$/año)

A continuación, en la tabla 2-2. Se realiza el calculo del coste de reparación anual (CAR) en dólares. La expresión para cuantificarlo es:

$$CAR = FF * (CMO + CM)$$

Dónde:

- FF: frecuencia de fallos (fallos/año)
- CMO: costes mano obra por fallo (US\$/fallo)

- CM: costes materiales por fallo (US\$/fallo)

Tabla 2-2. Cálculo del CAR

Modos de fallo	FF (fallos/año)	CMO (US\$)	CM (US\$)	CAR (US\$/año)
Fatiga de materiales	2	\$400.000	\$900.000	\$2.600.000
Abrasión	2	\$400.000	\$900.000	\$2.600.000
Sedimentos en el agua	2	\$400.000	\$900.000	\$2.600.000
Cavitación	2	\$400.000	\$900.000	\$2.600.000
Crecimiento tamaño de grano	2	\$400.000	\$900.000	\$2.600.000
Corrosión	1	\$200.000	\$300.000	\$500.000
Baja dureza	1	\$200.000	\$300.000	\$500.000
Desbalanceo	1	\$200.000	\$300.000	\$500.000
Excesivo aporte calórico	1	\$200.000	\$300.000	\$500.000
Baja resistencia	1	\$200.000	\$300.000	\$500.000

Fuente: Elaboración propia (2024). Técnicas de Análisis Causa Raíz.

A continuación, en la tabla 2-3. Se realiza el cálculo de penalización x evento fallo (PE) en dólares. La expresión para cuantificarlo es:

$$PE = TR * IP$$

Dónde:

- TR: tiempo de reparación (horas/fallo)

- IP: impacto producción (US\$/hora)
- PE: penalización x evento fallo (US\$/fallo)

Tabla 2-3. Cálculo PE

Modos de fallo	TR (horas)	IP (US\$/hora)	PE (US\$)
Fatiga de materiales	9360	\$11.300	\$105.768.000
Abrasión	9360	\$11.300	\$105.768.000
Sedimentos en el agua	9360	\$11.300	\$105.768.000
Cavitación	9360	\$11.300	\$105.768.000
Crecimiento tamaño de grano	9360	\$11.300	\$105.768.000
Corrosión	4680	\$11.300	\$52.884.000
Baja dureza	4680	\$11.300	\$52.884.000
Desbalanceo	4680	\$11.300	\$52.884.000
Excesivo aporte calórico	4680	\$11.300	\$52.884.000
Baja resistencia	4680	\$11.300	\$52.884.000

Fuente: Elaboración propia (2024). Técnicas de Análisis Causa Raíz.

A continuación, en la tabla 2-4. Se realiza el cálculo de la penalización anual por fallos (PAF) en dólares. La expresión para cuantificarlo es:

$$PAF = FF * PE$$

Tabla 2-4. PAF.

Modos de fallo	FF (fallos/año)	PE (US\$)	PAF (US\$/año)
Fatiga de materiales	2	\$105.768.000	\$211.536.000
Abrasión	2	\$105.768.000	\$211.536.000
Sedimentos en el agua	2	\$105.768.000	\$211.536.000
Cavitación	2	\$105.768.000	\$211.536.000
Crecimiento tamaño de grano	2	\$105.768.000	\$211.536.000
Corrosión	1	\$52.884.000	\$52.884.000
Baja dureza	1	\$52.884.000	\$52.884.000
Desbalanceo	1	\$52.884.000	\$52.884.000
Excesivo aporte calórico	1	\$52.884.000	\$52.884.000
Baja resistencia	1	\$52.884.000	\$52.884.000

Fuente: Elaboración propia (2024). Técnicas de Análisis Causa Raíz.

A continuación, se presenta la tabla 2-5. En donde se priorizó los modos de fallos en base al riesgo total anualizado (RTA):

Tabla 2-5. Jerarquización de los modos de fallo

Modos de fallo	CAR (US\$/año)	PAF (US\$/año)	RTA (US\$/año)
Fatiga de materiales	\$2.600.000	\$211.536.000	\$214.136.000
Abrasión	\$2.600.000	\$211.536.000	\$214.136.000
Sedimentos en el agua	\$2.600.000	\$211.536.000	\$214.136.000
Cavitación	\$2.600.000	\$211.536.000	\$214.136.000
Crecimiento tamaño de grano	\$2.600.000	\$211.536.000	\$214.136.000
Corrosión	\$500.000	\$52.884.000	\$53.384.000
Baja dureza	\$500.000	\$52.884.000	\$53.384.000
Desbalanceo	\$500.000	\$52.884.000	\$53.384.000
Excesivo aporte calórico	\$500.000	\$52.884.000	\$53.384.000
Baja resistencia	\$500.000	\$52.884.000	\$53.384.000

Fuente: Elaboración propia (2024). Técnicas de Análisis Causa Raíz.

Una vez definido el valor de Riesgo total anualizado (dinero/año) y jerarquizado cada modo de fallo (de mayor a menor), se orienta el esfuerzo de trabajo a los de mayor impacto, en este caso la fatiga de materiales por lo que se le dará prioridad en el análisis a corto plazo al rodete de la turbina Pelton.

2-2. Ensayos no destructivos (END)

Los ensayos no destructivos (END) se utilizan para evaluar la integridad, calidad y características de materiales, componentes y estructuras sin dañar los componentes inspeccionados. Industrias, como la aeroespacial, la construcción, la manufactura y la energía utilizan estos métodos. La elección del método depende de factores como el tipo de material,

el tipo de defecto que se busca detectar y las características específicas de la aplicación. La tabla 2-6. Menciona los principales ensayos no destructivos utilizados y sus aplicaciones.

Tabla 2-6. Ensayos no destructivos.

Ensayo	Principio	Aplicaciones
Inspección visual (VT)	Observación visual técnica	Detección de discontinuidades que afectan a la superficie visualmente accesible de los objetos.
Ultrasonido (UT)	Utiliza ondas ultrasónicas para evaluar la estructura interna de un material y detectar posibles defectos.	Detección de grietas, laminaciones, poros, socavados, inclusiones y otras discontinuidades que producen interfaces reflectivas pueden ser detectadas fácilmente.
Réplica metalográfica	A través de una réplica de la superficie la cual se examina en un microscopio para analizar la microestructura.	Permite ver el tamaño del grano y evaluar las fases, impurezas y defectos mecánicos.
Medida de dureza	Pequeño penetrador que es forzado sobre una superficie del material a ensayar en condiciones controladas de carga y velocidad de aplicación de la carga. Se mide la profundidad o tamaño de la huella resultante, lo cual se relaciona con un número de dureza.	Medición de durezas en diferentes puntos de componentes y materiales.

Termografía	Mide la radiación infrarroja emitida por el material para detectar variaciones de temperatura que pueden indicar defectos o irregularidades.	Se utiliza para detectar defectos internos, delaminaciones, humedad, sobrecalentamiento y otras anomalías en materiales y componentes
Radiografía industrial (RT)	Emplea radiación ionizante (rayos X o gamma) para obtener imágenes de la estructura interna de un objeto.	Inspección de soldaduras, detección de grietas, medición del grosor de materiales.
Partículas magnéticas (MT)	Aplica partículas magnéticas para identificar discontinuidades superficiales y sub-superficiales.	Detección de grietas, discontinuidades en materiales ferromagnéticos.
Líquidos penetrantes (PT)	Aplica un líquido penetrante que se absorbe en las discontinuidades superficiales y luego se revela mediante un revelador.	Detección de grietas, porosidades y otras discontinuidades en la superficie.
Corrientes inducidas (ET)	Emplea corrientes eléctricas alternas para detectar discontinuidades conductoras en materiales conductores.	Detección de discontinuidades, medición de propiedades de los materiales y mediciones dimensionales.

Fuente: Ipunto ensayos (2021). Ensayos no destructivos.

Los END contribuyen significativamente a la prevención de fallas, ayudan a mantener altos estándares de calidad y seguridad operativa. La implementación de sistemas de monitoreo y la atención a los procedimientos de mantenimiento son clave para minimizar los riesgos de las fallas.

2-3. Selección réplica metalográfica como técnica de análisis

Los parámetros para la selección del END a utilizar se exponen en la tabla 2-7. Los cuales están enfocados principalmente en combatir la fatiga del material.

Tabla 2-7. Selección END.

PARÁMETROS DE SELECCIÓN	ENSAYO NO DESTRUCTIVO								
	VT	UT	Dureza	Termografía	RT	MT	PT	ET	Réplica metalográfica
Revelación de detalles microestructurales									
Identificación de problemas intrínsecos									
Análisis detallado de fracturas									
Evaluación de propiedades mecánicas a nivel microscópico									
Optimización del diseño y selección de materiales									
Investigación de fallas complejas									
Mejor comprensión de la microestructura									
Detección de cambios microestructurales por procesos térmicos									

Fuente: Elaboración propia (2024).

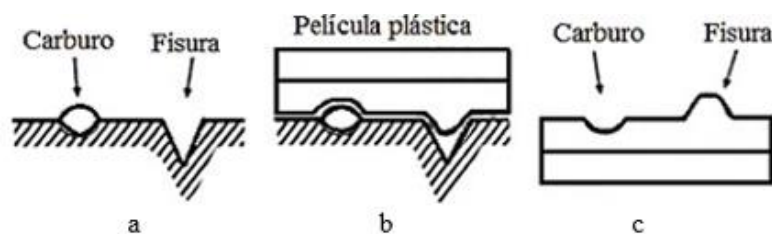
La técnica utilizada para el análisis según la tabla 2-7. Será la réplica metalográfica, ya que cumple con todos los parámetros de selección, es una técnica crucial para identificar características y cambios microestructurales en materiales. para evaluar el estado, identificar posibles fallos y establecer estrategias de mantenimiento adecuadas.

Además, se puede complementar con otro END llamado control de dureza ultrasónica, el que consiste en medir la frecuencia de vibración de una sonda de ultrasonidos cuando se pone en contacto con la superficie del material. Cuanto más duro sea el material, mayor será la impedancia de contacto, la impedancia de contacto es la resistencia al flujo de vibraciones. Los equipos de control de dureza ultrasónico son generalmente portátiles y ligeros, lo que facilita su uso en campo.

2-4. Réplicas metalográficas

El método de réplicas metalográficas fue incorporado por primera vez en el año de 1957 por Pierd A. Jacquet, las réplicas metalográficas son un método basado en la observación de la microestructura del componente. Esta reproducción se obtiene mediante una película plástica o celuloide que facilita el grabado de la imperfección superficial, llamada réplica, la cual copia el relieve de la superficie tal como se muestra esquemáticamente en la figura 2-1.

Figura 2-1. Secuencia de obtención de la réplica.



Fuente: Rodolfo Mussini & Mario González, 2003

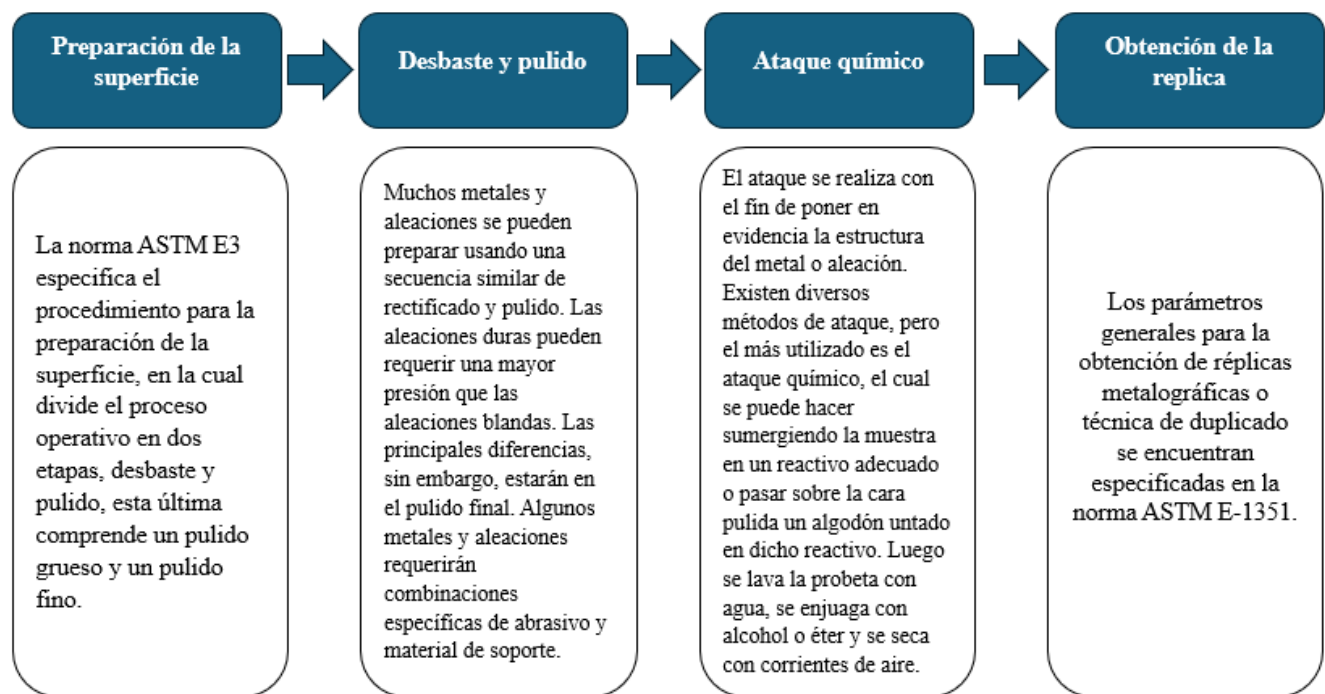
La secuencia de obtención de la réplica: a: Superficie pulida y atacada, b: Aplicaciones de la película ablandada y c: Réplica que constituye el negativo de la superficie.

2-4-1. Parámetros generales para producción y evaluación de réplicas metalográficas

Para la obtención de una réplica metalográfica es necesario proceder conforme una serie de pasos ordenados y específicos, este procedimiento ha sido establecido mediante norma estándar por la ASTM E1351, en donde se puede encontrar las guías del procedimiento en términos generales para la preparación de la muestra y la selección del reactivo que facilita el grabado de las imperfecciones superficiales que pudieran existir. En las guías del

procedimiento estándar los parámetros están expuestos indistintamente del elemento y tipo de material a analizar. Así, en esta sección se detalla el procedimiento conforme estándares orientado a la obtención de réplicas metalográficas de los cangilones del rodete Pelton. El procedimiento estándar de réplica metalográfica se divide en cuatro etapas las cuales se muestra en la figura 2-2. Cada una de estas etapas consta de una serie de parámetros que se deben tener en cuenta para obtener resultados satisfactorios.

Figura 2-2. Etapas obtención replica metalográfica



(ASTM International, 2003)

Fuente: Elaboración propia (2024). ASTM.

En la figura 2-2. Se observa la secuencia para la obtención de una réplica metalográfica.

En el capítulo 3, con el análisis de las réplicas metalográficas, mantenimiento basado en la condición, realizado a las turbinas Pelton de la central El Toro se tomarán las acciones correspondientes para seleccionar las estrategias de mantenimiento a utilizar, permitiendo identificar con precisión y detalle el estado del rodete, anticipándose a posibles fallos y optimizando la vida útil de la turbina.

3- Capítulo 3: Elaboración de una matriz de estrategia de mantenimiento proactivo.

Capítulo 3: Elaboración de una matriz de estrategia de mantenimiento proactivo.

3.1- Metodología de análisis basado en la condición de los rodets

En este capítulo, se hará un desarrollo metodológico para ejecutar el análisis basado en la condición, utilizando replica metalográfica y análisis de dureza con método ultrasónico que ayudará a determinar el estado actual del material de cada uno de los rodets, de la unidad 1, unidad 2, unidad 3 y unidad 4 de la central El Toro.

Este servicio es ejecutado por ASMAR, para ejecutar el replicado metalográfico se solicita a la central El Toro ejecutar las siguientes actividades, de tal manera de que se pueda ejecutar de forma ordenada, simple y sin contratiempos desde el punto de vista técnico y de seguridad. Para ello se solicita: detener la máquina, abrir la escotilla, habilitar andamios, habilitar perímetro de seguridad, análisis de trabajo seguro, y habilitar procedimientos de paso a paso de ejecución de la rutina de ensayos no destructivos.

Inicialmente se hace la medición de dureza en diversos lugares que son denominados como “críticos”, al ser los puntos donde se concentran la mayor cantidad de esfuerzos en los capachos del rodete. Luego de medir la dureza mediante ultrasonido se ejecuta una comparación de los resultados y se contrasta con el requerimiento normativo para ese material y así comprobar si está dentro o fuera de la norma. Como segunda fase se ejecuta el ensayo replicado en el mismo contexto, el resultado también da cuenta de un análisis morfológico del estado del material donde nos permite evaluar los parámetros críticos para el material base de un rodete Pelton.

Las exigencias del estándar del material del rodete, clasificado bajo SA 743 CA-6NM, indica una dureza máxima de 285 HB, y con la finalidad de dar una clasificación de calidad, utilizamos también el estándar SA 487 CA-6NM, ambas pertenecientes al código ASME II-2021.

- Rango de dureza requerida 255 HB, conforme ASME SA-487.
- Rango de dureza requerida 285 HB, conforme ASME SA-743.

Clasificación/evaluación de durezas:

- Dureza BUENA, cumple con ambos estándares.
- Dureza ACCEPTABLE, cumple solo con SA-487.
- Dureza ALTA, sobrepasa el limite superior de ambos estándares.

Se ejecutará una matriz de decisión que permitirá periodicidad y priorización de la ejecución de las acciones.

3.2- Mediciones de dureza macro HB (UCI)

Se realizan mediciones de dureza, a través del método de ultrasonido UCI para determinar el estado superficial del material en la zona indicada en la figura 3-1., lugares que son denominados como “críticos”, al ser los puntos donde se concentran la mayor cantidad de esfuerzos en los capachos del rodete. Los puntos de los capachos analizados se denominarán para cada rodete en particular.

Figura 3-1. Lugar donde se realizaron los ensayos



Fuente: Informe técnico ASMAR (2023), central El Toro.

En la figura 3-1. Se muestra la zona en donde se realizó la medición de la dureza HB (UCI) en los distintos capachos.

Las siguientes tablas (3-1., 3-2., 3-3., 3-4.) indica los valores de las mediciones efectuadas a los cuatro rodetes:

Tabla 3-1. Tabla mediciones de dureza rodete 1

Rodete número 1											
Tabla mediciones de dureza HB											
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
5.1	160	160	169	148	149	160	147	158	148	151	155
5.2	210	200	207	228	208	207	206	206	205	201	208
8.1	157	156	160	166	152	160	149	157	155	162	175
8.2	227	203	201	205	222	207	200	204	198	203	207
19.1	189	220	210	204	205	217	202	204	210	200	206
19.2	172	170	162	173	180	184	163	158	160	160	168

Fuente: Informe técnico ASMAR (2023), central El Toro.

Tabla 3-2. Tabla mediciones de dureza rodete 2

Rodete número 2											
Tabla mediciones de dureza HB											
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
C5	217	222	243	214	230	235	227	230	233	230	228
C9	217	220	235	218	229	234	231	220	231	226	226
C16	223	221	212	234	211	240	210	214	223	228	222
C20	242	232	222	212	231	240	233	240	233	231	232

Fuente: Informe técnico ASMAR (2023), central El Toro.

Tabla 3-3. Tabla mediciones de dureza rodete 3

Rodete número 3											
Tabla mediciones de dureza HB											
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
C3	200	242	176	169	168	183	205	189	205	181	191
C7	200	242	200	197	197	200	199	199	197	210	204
C14	209	200	200	225	200	190	215	215	195	195	202
C18	200	173	180	180	200	178	197	197	192	180	188

Fuente: Informe técnico ASMAR (2023), central El Toro.

Tabla 3-4. Tabla mediciones de dureza rodete 4

Rodete número 4											
Tabla mediciones de dureza HB											
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
C1	190	189	180	196	200	182	200	199	201	190	193
C5	220	210	220	238	220	240	228	230	221	225	225
C17	217	215	226	205	214	206	220	215	215	209	214
C20	181	190	199	201	195	200	190	189	180	186	191

Fuente: Informe técnico ASMAR (2023), central El Toro

Las mediciones de la tabla 3-1, 3-2, 3-3, 3-4, se encuentran por debajo del máximo permitido por ambos estándares, consideramos que el material se encuentra bajo en resistencia mecánica, baja resistencia a la abrasión/erosión y baja resistencia a la fatiga, todos proporcionalmente relacionados. Posiblemente estos rodetes cuentan con excesivos tratamientos térmicos con la consiguiente pérdida de dureza, y aumento del tamaño de grano, esta última condición será evaluada en la etapa de análisis metalográfico.

3.3- Análisis microestructural

El estudio del estado metalográfico se realiza para determinar las propiedades físicas del material, en este caso para evaluar la microestructura y un posible tratamiento térmico, el cual debería contrastarse con la condición actual de trabajo a la que se encuentra sometido el rodete. A continuación, se presentan micrografías de cada capacho analizado, obtenidas a través de la técnica de ensayos no destructivo, como lo es el replicado metalográfico (anexo 1).

3-3-1 Rodete número 1

Los puntos de los capachos analizados, de ahora en adelante, se denominarán como “5.1”, “5.2”, “8.1”, “8.2”, “19.1”, “19.2”. Estas zonas se definieron para evaluar capachos no consecutivos, como un muestreo representativo de la condición general del rodete.

Punto “5.1”, observamos la microestructura martensítica, con zonas porosas que indican la presencia de pitting distribuido uniformemente. La microestructura muestra bordes de grano prior, con zonas características de segregación durante la fusión del material base. También observamos algunas “piletas” de ferrita definidas como no deseables en una microestructura de un rodete Pelton, debido a la facilidad para formar microgrietas (ver zonas destacadas en amarillo).

Punto “5.2”, se destaca la presencia de bastones de martensita, con ferrita fina entre ellas. Observamos la presencia de “piletas” de ferrita masiva, en bordes de grano prior y la formación de microgrietas a partir de dichas piletas.

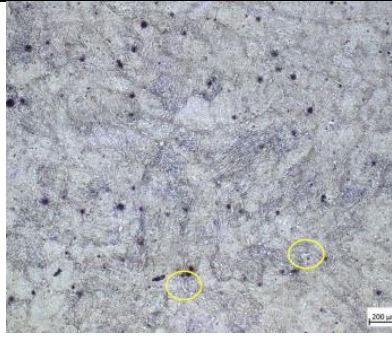
Punto “8.1”, se mantiene la constitución metalográfica, dominada por la martensita revenida y en el caso de la imagen de la izquierda, detectamos el origen de dos microgrietas. Otras líneas continuas, son bordes de granos prior que presentan segregaciones.

Punto “8.2”, baja cantidad de “piletas” de ferrita, microestructura constituida principalmente de martensítica revenida. Se ha identificado una microgrieta.

Punto “19.1”, microestructura martensítica con evidencia de revenido, presencia de “piletas” de ferrita y abundante pitting y carburos dispersos. Hemos destacado tres regiones que contienen discontinuidades clasificadas como microgrietas

Punto “19.2”, microestructura martensítica, con evidencia de revenido y ferrita fina entre agujas. Presencia perjudicial de “piletas” de ferrita. Se han identificado y destacado zonas con microgrietas en crecimiento.

Figura 3-2. Réplica metalográfica rodete 1

Rodete 1		
Punto	Punto	Punto
5.1	8.1	19.1
		

Fuente: Elaboración propia (2024), réplica metalográfica.

3-3-2 Rodete número 2

Los puntos de los capachos analizados, de ahora en adelante, se denominarán como “C5”, “C9”, “C16”, “C20”. Estas zonas se definieron para evaluar capachos no consecutivos, como un muestreo representativo de la condición general del rodete.

Punto 5, se presenta con ferrita fina entre agujas de martensita revenida. Observamos algo de pitting, menos que en otros rodetes, y no existe evidencia de piletas de ferrita perjudicial. El tamaño de grano se encuentra muy por encima de los 100 micrones, como hemos identificado propio de un material con exceso de exposición a altas temperaturas. Una

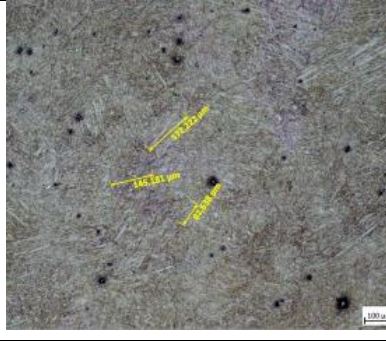
microgrieta de 480 micrones de largo, y 80 micrones de profundidad, ramificada indica que nos encontramos en presencia de crecimiento de grieta por fatiga.

Punto 9, se observa con pitting, y tamaño de grano grande en exceso por sobre los 100 micrones. Destacamos en amarillo una microgrieta de 350 micrones de largo y 125 micrones de profundidad. El material en si se observa sano, con ferrita fina entre agujas de martensita revenida, y solo algunas piletas de ferrita perjudicial.

Punto C16, presencia de pitting superficial, piletas de ferrita en baja cantidad y tamaño, ferrita fina sana (más gruesa que otros capachos), entre agujas de martensita revenida. No se observan discontinuidades. Grano basto, grande, denota exceso de calor acumulado en ciclos de tratamientos térmicos.

Punto C20, nuevamente una microestructura constituida de ferrita fina entre agujas de martensita revenida, presencia de granos austeníticos prior grandes, bastos. Pequeñas porciones de piletas de ferrita perjudicial, en poca cantidad. Material libre de grietas o discontinuidades.

Figura 3-3. Réplica metalográfica rodete 2

Rodete 2		
Punto	Punto	Punto
C5	C9	C16
		

Fuente: Elaboración propia (2024), réplica metalográfica.

3-3-3 Rodete número 3

Los puntos de los capachos analizados, de ahora en adelante, se denominarán como “C3”, “C7”, “C14”, “C18”. Estas zonas se definieron para evaluar capachos no consecutivos, como un muestreo representativo de la condición general del rodete.

Punto C3, microestructura acicular, con ferrita fina entre agujas de martensita revenida. Se observan escasas y pequeñas piletas de ferrita perjudicial. Se detecta y se marca una microgrieta de 145 [μm] de largo, por unos 50 [μm] de profundidad. También observamos la presencia de granos equiaxiales austeníticos prior de gran tamaño, lo cual indica que el material ha sido sometido a varios ciclos de tratamiento térmico produciendo el crecimiento de granos, con la consiguiente reducción en dureza y tenacidad.

Punto C7, observamos una microestructura martensítica, con abundante ferrita fina entre las agujas, observamos algunas piletas de ferrita (menor cantidad que en el rodete 1). Las mediciones de tamaño de grano austenítico prior, muy relevante en la determinación de las condiciones de calidad del material base, nos muestra tamaños excesivos que alcanzan en algunos de los vértices 1 [mm], y en promedio 0,5 [mm], correspondiendo a una clasificación conforme ASTM E112 # 0,0 siendo esta la clasificación de tamaño mayor.

Punto C14, observamos una microestructura martensítica, con signos de corrosión por pitting, algunas piletas de ferrita (menor que en rodete 1), y ferrita fina entre las agujas de martensita.

Punto C18, como en los puntos anteriores, se repite la ferrita fina entre las agujas de martensita, y el inicio de corrosión por pitting. Posiblemente una pérdida local de la solubilidad del cromo formando carburos, ha producido un empobrecimiento focalizado de este elemento, perdiendo la inoxidableidad deseable en estos rodetes.

Figura 3-4. Réplica metalográfica rodete 3

Rodete 3		
Punto	Punto	Punto
C3	C7	C18



Fuente: Elaboración propia (2024), réplica metalográfica.

3-3-4 Rodete número 4

Los puntos de los capachos analizados, de ahora en adelante, se denominarán como “C1”, “C5”, “C17”, “C20”. Estas zonas se definieron para evaluar capachos no consecutivos, como un muestreo representativo de la condición general del rodete.

Punto C1, los materiales muestran la microestructura martensítica revenida, con ferrita entre agujas, que es un buen indicador, sin embargo y, por el contrario, observamos tamaños de grano muy por encima de los 70 micrones. Además, se destaca la presencia de microgrietas con tamaños de 400 micrones y una profundidad 130 micrones.

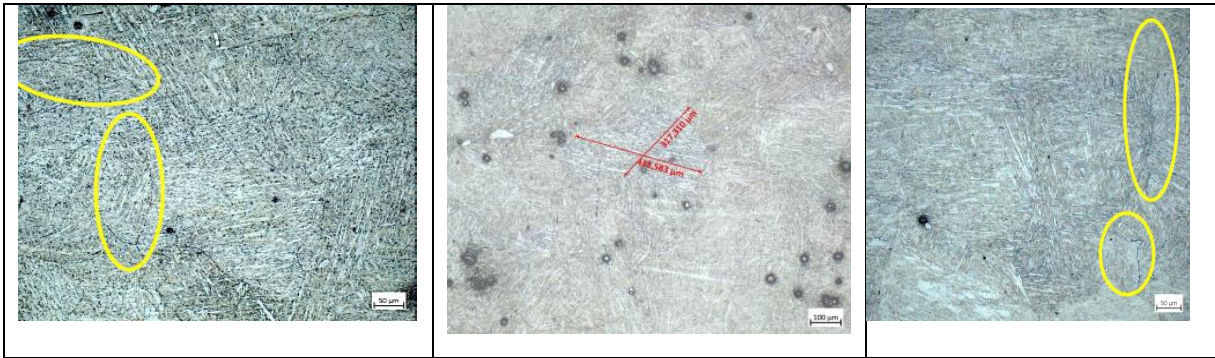
Punto C5, microestructura que nuevamente muestra ferrita entre agujas de martensita, pero con un tamaño de grano prior austenítico grande, muy por sobre los 70 micrones. Se observan piletas de ferrita acumulada de tamaño pequeño y mediano.

Punto C17, microestructura con ferrita fina entre agujas de martensita revenida, piletas de ferrita acumulada, y granos grandes por sobre el límite superior de 70 micrones.

Punto C20, microestructura con ferrita fina entre agujas de martensita, grano grande, muy por sobre los 70 micrones. Se observan algunas microgrietas.

Figura 3-5. Réplica metalográfica rodete 4

Rodete 4		
Punto	Punto	Punto
C1	C5	C20



Fuente: Elaboración propia (2024), réplica metalográfica.

3.5- Elaboración de una matriz de estrategia de mantenimiento proactivo referente a rodetes de turbina Pelton.

3.5.1- Selección de los parámetros críticos para el material base de un rodete Pelton

La matriz de análisis se realizó considerando que la primera causa raíz de falla de un rodete Pelton es la fatiga, dado esto el primer parámetro a medir es la dureza; lo que ayuda a comprobar si el material se encuentra bajo en: resistencia mecánica, resistencia a la abrasión/erosión y resistencia a la fatiga, todos proporcionalmente relacionados. Además, el tamaño de grano deseable para un acero martensítico ASTM SA 487 CA6NM depende de la aplicación específica del acero. En esta aplicación el tamaño de grano deseable es de 9 – 70 (μm), determinado por el laboratorio de SolCoLab. La normativa ASTM E112 hace mención de que un grano más fino es deseable para la mayoría de las aplicaciones y da las razones: mayor resistencia y tenacidad, mejor ductilidad y resistencia a la fatiga. De manera contraria la distribución de “piletas” de ferrita retenidas de forma gruesa y abultada en bordes de grano no es deseable en un rodete tipo Pelton, ya que: disminuyen su tenacidad, acelera el desgaste, y aumenta el riesgo de cavitación. Finalmente se debe indicar si el material presenta microgrietas ya que existe un riesgo potencial de agrietamiento o fractura en alguna de las raíces del rodete. Estos parámetros ayudan a determinar la vida remanente del componente y acciones de mantenimiento a realizar.

3.5.2- Análisis de los parámetros críticos para el material base de un rodete Pelton

Con la finalidad de entregar al cliente una condición comparativa de calidad, se realizó un ranking de calidad entre los 4 rodetes analizados (Tabla 3-5.). Sin embargo, debe considerar que, existiendo daño es necesario abordar todos aquellos que puedan ser reparados, ya que cualquiera de ellos pudiera llevar a una falla catastrófica. Dicho ranking, tendrá por finalidad solamente detectar el rodete que requiere menor intensidad y cantidad de reparación, dicho de otra forma, un ranking de rodetes desde el menos reparable, hasta el más reparable.

Tabla 3-5. Matriz de análisis de los parámetros críticos para rodete Pelton central El Toro

Morfología microscópica	Parámetro requerido	Rodete 1	Rodete 2	Rodete 3	Rodete 4
Tamaño de grano deseable en un rodete	9 – 70 [μm]	Todos los puntos inspeccionados sobre 100 [μm]	Ninguno punto presenta grano menor a 70 [μm]	Ninguno punto presenta grano menor a 70 [μm]	Ninguno punto presenta grano menor a 70 [μm]
Tamaño de grano no deseable en un rodete	Sobre 70 [μm]	Todos los puntos evaluados superan 70 [μm]	Todos los puntos evaluados superan 70 [μm]	Todos los puntos evaluados superan 70 [μm]	Todos los puntos evaluados superan 70 [μm]
Distribución de la ferrita retenida deseable	Fina, distribuida al interior de los granos prior	Presente en todos los puntos evaluados	Presente en todos los puntos evaluados	Presente en todos los puntos evaluados	Presente en todos los puntos evaluados
Distribución de “piletas” de ferrita retenida, no deseable en un rodete	Gruesa, abultada en bordes de grano	Presente en los puntos 5.1, 5.2, 19.1 y 19.2	Muy poca y pequeña cantidad	Presente en todos los puntos, pero tamaño reducido	C5 y C17
Presencia de microgrietas	No deben existir discontinuidades	Discontinuidades en todos los puntos evaluados	Discontinuidades en los puntos C5, C9	Discontinuidades en los puntos C3, C14 y C18	Discontinuidades en los puntos C1 y C20

Fuente: Elaboración propia (2024), replica metalográfica SolCoLab.

De la Tabla 3-5. Se puede concluir:

- Peor condición rodete número 1.
- Condición intermedia rodete número 4.
- Mejor condición rodete número 3.
- Mejor condición de los cuatro rodetes el número 2.

En resumen, un tamaño de grano fino es deseable en rodetes, este depende principalmente del tipo de fabricación del rodete, y de los sucesivos tratamientos térmicos realizados en las campañas de recuperación. Todos los puntos analizados en este reporte presentan tamaño de grano basto (grande). Desde el punto de vista microestructural, el rodete número 2, se encuentra en condiciones adecuadas, sin embargo, la presencia de microgrietas y el tamaño de grano basto, no permiten clasificarlo como sano, pero es el rodete que presenta mejores condiciones comparativas para ser reparado y reacondicionado.

Dado que la tabla 3-5. deja parámetros importantes fuera por no poseer la información necesaria, en este trabajo se propone una matriz referenciada con parámetros normativos y sumatoria ponderable y objetiva (tabla 3-6.).

Tabla 3-6. Matriz de análisis parámetros críticos para el material CA6NM

Morfología microscópica	Parámetro requerido	N° de componente	N° de componente	Referencias normativas
Tamaño de grano deseable	9 -70 um			ASTM E112
Tamaño de grano no deseable	Mayor 70 um			ASTM E112
Distribución de ferrita retenida deseable	Fina, distribuida al interior de los granos prior			ASTM E112
Distribución de “piletas” de ferrita retenida, no deseables	Gruesa, abultada en bordes de grano			ASTM E112

Presencia de microgrietas	No deben existir discontinuidades			CCH70 3
Dureza HB	255 HB			ASME SA-487
	285 HB			ASME SA-743
Trazabilidad de Reparaciones con Soldadura	Existe / No existe			ASME IX
Trazabilidad de Tratamientos térmicos anteriores	Existe / No existe			ASTM A743
SUMA				

Fuente: Elaboración propia (2024), matriz parámetros críticos CA6NM.

Matriz propuesta de análisis de los parámetros críticos para el material CA6NM base de un rodete de turbina hidroeléctrica. Esta matriz se llena con un numero 0 cuando es favorable, y 1 cuando no es favorable. La suma de todos los parámetros nos suministrara información para la toma de decisión respecto al rodete de mayor ponderación, considerándose el rodete más crítico. Las estrategias de mantenimiento podrán ser las siguientes:

1. Seguir ejecutando análisis de metalográficos, durezas y ensayos no destructivo, de forma periódica.
2. Reparar y someter a tratamientos térmicos de revenidos y alivio de tensiones.
3. Reemplazar el rodete por uno nuevo.

3.6- Recomendaciones de mantenimiento

La detección de microgrietas nos lleva a considerar que existe un riesgo potencial de agrietamiento o fractura en alguna de las raíces del rodete. Es fundamental tener en cuenta que se realizaron inspecciones y análisis en cuatro capachos, los cuales habían mostrado indicios de desgaste avanzado y porosidad en evaluaciones previas al trabajo, se recomienda

un proceso de fusión sin aporte en todas las raíces de los capachos en la próxima campaña de recuperación.

Se recomendará un tratamiento térmico de reacondicionamiento con la finalidad de aliviar, homogenizar la dureza, reducir la presencia de piletas de ferrita. Lo anterior, dada la distribución de defectos de diferentes puntos analizados, donde en algunos encontramos grietas y en otras piletas de ferrita, y en todas las unidades analizadas la presencia de granos grande que superan el tamaño recomendado (70 micrones). En este punto, es imperativo recomendar un enfoque de tratamiento térmico ad-hoc para cada rodete, en lugar de aplicar un estándar general.

3-6-1. Procedimiento de soldadura por método de recapado

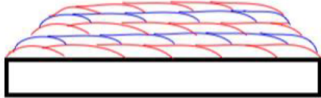
Debido a que la soldadura en si es un proceso metalúrgico complejo, el cual provocará cambios microestructurales que afectan las propiedades mecánicas de los componentes, por lo cual, es necesario un correcto análisis de las estructuras que se formaran, esto con el fin de poder planificar la siguiente etapa de reacondicionamiento de buena manera, evitando producir grietas y controlando los niveles de dureza del rodete. El proceso actual realizado consiste en relleno por soldadura mediante el proceso de soldadura semiautomático FCAW con alambre tubular, siguiendo el procedimiento WPS MCAW Hard Facing 001.

- 1) Inicialmente se prepara la zona erosionada o dañada mediante amolado con piedra de abrasión.
- 2) Antes de iniciar la aplicación del cordón de soldadura, se efectuará precalentamiento de la zona de trabajo mediante soplete de propano entre 150-370°C con el fin de evitar agrietamiento del cordón de soldadura, tal como establece la norma ASTM A 743.
- 3) El material de aporte utilizado corresponde a AWS A5.22 EC410NIMO, P N 6 grupo que contienen todos los aceros martensíticos. La temperatura entre pasadas será de 100 a 160 °C. La velocidad de avance será entre 180 y 250 mm/min según WPS

4) Temperatura post soldadura: 590° por 2 horas

En las siguientes figuras 3-6. y 3-7. Se expone el procedimiento de soldadura WPS MCAW Hard Facing 001 (Anexo 2).

Figura 3-6. Procedimiento de soldadura WPS

	QW-482 FORMATO SUGERIDO ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (QW-200.1, Código ASME Sección IX Calderas y Recipientes a Presión).																																																																																										
Nombre de Compañía: <u>Astilleros y maestranzas de la Armada</u> Por: <u>Carlos A Vergara B</u> Espec. de Procedimiento N°: <u>WPS-MCAW-Hard-Facing-001</u> Fecha: <u>07-10-2018</u> Revisión N°: <u>A.2</u> Soportado por PQR N°: <u>PQR-MCAW-Hard-Facing-001</u> Fecha: _____ Procesos de Sold.: <u>FCAW (MCAW)</u> Tipo (s): <u>Manual</u>																																																																																											
UNIONES (QW-402) Diseño Unión: <u>De acuerdo con plano de fabricación</u> Abertura de Raíz: <u>Si fuera necesario: 0 to 3 mm (+1)</u> Respaldo: Si ☒ o No ☒ Material Respaldo (tipo): <u>Metal de soldadura - o - P 1</u> Referir a ambos respaldo y retenedor <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Sin Retenedores</td> <td>☒</td> <td>Con Retenedores</td> <td>☒</td> </tr> </table> Bosquejos, Planos de Producción, Símbolos de Soldadura o la descripción escrita deben mostrar la disposición general de piezas que serán soldadas. Donde aplique, se especificarán el espaciamiento de raíz y los detalles del bisel de soldadura. [A opción del fabricante, los bosquejos se pueden anexar para ilustrar diseño de la junta, pasadas de soldadura y secuencia de pasadas (e.g. para los procedimientos de tenacidad por entalla, para procedimientos de proceso múltiples, etc).] Todos los valores en milímetros Detalles 		Sin Retenedores	☒	Con Retenedores	☒																																																																																						
Sin Retenedores	☒	Con Retenedores	☒																																																																																								
METALES BASE (QW-403) P.N° <u>6</u> Grupo N° <u>4</u> a P N° <u>6</u> Grupo N° <u>4</u> Especificación y Tipo / Grado o Número UNS: <u>ASTM A 743 CA-6NM</u> a Especificación y Tipo / Grado o Número UNS: <u>ASTM A 743 CA-6NM</u> Análisis Químico y Propiedades Mecánicas: _____ a Análisis Químico y Propiedades Mecánicas: _____ Rango de Espesores: _____ Metal Base: de Tope <u>hasta 25 mm (1 Inch-)</u> Filete <u>Todos</u> Espesor Máximo de Pasada de Soldadura <u>≤ 13 mm</u> Otros: <u>No</u>																																																																																											
METALES DE APORTE (QW-404) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Especif. N° (SFA)</td> <td style="width: 20%;">5.22</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> </tr> <tr> <td>Clasificación AWS</td> <td>EC410NiMo (mod.)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>F. N°</td> <td>6</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>A.N°</td> <td>No asignado</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tamaño Metal Aporte Ø)</td> <td>1.2 - 1.6 mm</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Forma Producto Metal Aporte</td> <td>Tubular</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Metal Aporte Suplementario</td> <td>No</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Metal de Soldaduras</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rango de Espesor Unión Tope</td> <td>hasta 25.0 mm</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rango de Espesor Unión Filete</td> <td>Todos</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Clasif. Electrodo-Fundente</td> <td>No aplicable</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tipo de Fundente</td> <td>No aplicable</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Marca Fundente</td> <td>No aplicable</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Inserto Consumible</td> <td>No aplicable</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td>No</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		Especif. N° (SFA)	5.22					Clasificación AWS	EC410NiMo (mod.)					F. N°	6					A.N°	No asignado					Tamaño Metal Aporte Ø)	1.2 - 1.6 mm					Forma Producto Metal Aporte	Tubular					Metal Aporte Suplementario	No					Metal de Soldaduras						Rango de Espesor Unión Tope	hasta 25.0 mm					Rango de Espesor Unión Filete	Todos					Clasif. Electrodo-Fundente	No aplicable					Tipo de Fundente	No aplicable					Marca Fundente	No aplicable					Inserto Consumible	No aplicable					Otros	No				
Especif. N° (SFA)	5.22																																																																																										
Clasificación AWS	EC410NiMo (mod.)																																																																																										
F. N°	6																																																																																										
A.N°	No asignado																																																																																										
Tamaño Metal Aporte Ø)	1.2 - 1.6 mm																																																																																										
Forma Producto Metal Aporte	Tubular																																																																																										
Metal Aporte Suplementario	No																																																																																										
Metal de Soldaduras																																																																																											
Rango de Espesor Unión Tope	hasta 25.0 mm																																																																																										
Rango de Espesor Unión Filete	Todos																																																																																										
Clasif. Electrodo-Fundente	No aplicable																																																																																										
Tipo de Fundente	No aplicable																																																																																										
Marca Fundente	No aplicable																																																																																										
Inserto Consumible	No aplicable																																																																																										
Otros	No																																																																																										

Cada combinación de Metal base - Metal de Aporte deberá ser registrado individualmente.

Solo los documentos identificados como "Controlado" están bajo dicha condición. La última versión digital es la predominante ante la impresa

Fuente: ASMAR V (2018), WPS ASTM A 743 CA-6NM.

Figura 3-7. Procedimiento de soldadura WPS (2)

	QW-482 PAGINA TRASERA ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (QW-200.1, Código ASME Sección IX Calderas y Recipientes a Presión).																																																																																																				
Espec. de Procedimiento N°: <u>WPS-MCAW-Hard-Facing-001</u> Fecha <u>07-10-2018</u> Revisión N° <u>A.2</u>																																																																																																					
POSICIONES (QW-405) Posiciones de Bisel <u>1G-2G-3G, 1F, 2F, 3F</u> Progresión Soldadura Ascend. ☒ Descend. ☒ Posiciones de Filete <u>Todos</u> Otro: <u>No aplicar en posición Sobre Cabeza</u>	TRATAMIENTO TERMICO POSTSOLDADURAS (QW-407) Rango de Temperaturas <u>580° a 620°C</u> Rango de Tiempo <u>1 hora / pulgada de espesor</u> Otro: <u>Se recomienda control de dureza y microestructura</u>																																																																																																				
PRECALENTAMIENTO (QW-406) Tem. Precalen. Min. <u>100- 160°C máx.</u> Tem. Interpaso Máx. <u>100-160°C máx.</u> Mant. Precalent. <u>Enfriamiento -50°/hora</u> Otro: <u>Las temperaturas deben ser revisadas al recuperar una turbina completa</u> (Temperatura continúa o especial, donde aplique, debe ser registrada).	GAS (QW-408) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3">Porcentaje de Composición</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>Mezcla (%)</th> <th>Flujo (lpm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Protección</td> <td>Ar+2%CO2</td> <td>8 - 14</td> </tr> <tr> <td>Arrastre</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Respaldo</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Otro</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Porcentaje de Composición			Gas(es)	Mezcla (%)	Flujo (lpm)	Protección	Ar+2%CO2	8 - 14	Arrastre			Respaldo			Otro																																																																																				
Porcentaje de Composición																																																																																																					
Gas(es)	Mezcla (%)	Flujo (lpm)																																																																																																			
Protección	Ar+2%CO2	8 - 14																																																																																																			
Arrastre																																																																																																					
Respaldo																																																																																																					
Otro																																																																																																					
CARACTERISTICAS ELECTRICAS (QW-409) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">N° Paso Sold.</th> <th rowspan="2">Proceso</th> <th colspan="2">Metal Aporte</th> <th colspan="2">Corriente</th> <th rowspan="2">Veloc. Aliment. Alambre Rango</th> <th rowspan="2">Calor de aporte máximo</th> <th rowspan="2">Voltaje Rango</th> <th rowspan="2">Rango Velocidad Avance mm/min</th> <th rowspan="2">Otros (Observaciones, comentarios, adición de temperatura al alambre, técnica, ángulo del soplete, etc.)</th> </tr> <tr> <th>Clasific.</th> <th>Diam. mm</th> <th>Tipo y Polaridad</th> <th>Amp. Rango</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>FCAW</td> <td>EC410NiMo(Mod)</td> <td>1,2</td> <td>CCEP</td> <td>180-230</td> <td>Ajuste Amp</td> <td>15 KJ/Cm</td> <td>30-35</td> <td>180-230</td> <td rowspan="4">Velocidad avance, debe ser tal que al calcular por ecuación de Calor de Entrada no sea mayor al valor requerido.</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>FCAW</td> <td>EC410NiMo(Mod)</td> <td>1,2-1,6</td> <td>CCEP</td> <td>190-240</td> <td>Ajuste Amp</td> <td>15 KJ/Cm</td> <td>32-38</td> <td>200-250</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>FCAW</td> <td>EC410NiMo(Mod)</td> <td>1,2-1,6</td> <td>CCEP</td> <td>190-240</td> <td>Ajuste Amp</td> <td>15 KJ/Cm</td> <td>32-38</td> <td>200-250</td> </tr> <tr> <td>4 a N</td> <td>FCAW</td> <td>EC410NiMo(Mod)</td> <td>1,2-1,6</td> <td>CCEP</td> <td>190-240</td> <td>Ajuste Amp</td> <td>15 KJ/Cm</td> <td>32-38</td> <td>200-250</td> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> Los rangos de Amperaje y Voltaje deben ser registrados por cada tamaño de electrodo, posición y espesor, etc.		N° Paso Sold.	Proceso	Metal Aporte		Corriente		Veloc. Aliment. Alambre Rango	Calor de aporte máximo	Voltaje Rango	Rango Velocidad Avance mm/min	Otros (Observaciones, comentarios, adición de temperatura al alambre, técnica, ángulo del soplete, etc.)	Clasific.	Diam. mm	Tipo y Polaridad	Amp. Rango	1	FCAW	EC410NiMo(Mod)	1,2	CCEP	180-230	Ajuste Amp	15 KJ/Cm	30-35	180-230	Velocidad avance, debe ser tal que al calcular por ecuación de Calor de Entrada no sea mayor al valor requerido.	2	FCAW	EC410NiMo(Mod)	1,2-1,6	CCEP	190-240	Ajuste Amp	15 KJ/Cm	32-38	200-250	3	FCAW	EC410NiMo(Mod)	1,2-1,6	CCEP	190-240	Ajuste Amp	15 KJ/Cm	32-38	200-250	4 a N	FCAW	EC410NiMo(Mod)	1,2-1,6	CCEP	190-240	Ajuste Amp	15 KJ/Cm	32-38	200-250																																												
N° Paso Sold.	Proceso			Metal Aporte		Corriente							Veloc. Aliment. Alambre Rango	Calor de aporte máximo	Voltaje Rango	Rango Velocidad Avance mm/min	Otros (Observaciones, comentarios, adición de temperatura al alambre, técnica, ángulo del soplete, etc.)																																																																																				
		Clasific.	Diam. mm	Tipo y Polaridad	Amp. Rango																																																																																																
1	FCAW	EC410NiMo(Mod)	1,2	CCEP	180-230	Ajuste Amp	15 KJ/Cm	30-35	180-230	Velocidad avance, debe ser tal que al calcular por ecuación de Calor de Entrada no sea mayor al valor requerido.																																																																																											
2	FCAW	EC410NiMo(Mod)	1,2-1,6	CCEP	190-240	Ajuste Amp	15 KJ/Cm	32-38	200-250																																																																																												
3	FCAW	EC410NiMo(Mod)	1,2-1,6	CCEP	190-240	Ajuste Amp	15 KJ/Cm	32-38	200-250																																																																																												
4 a N	FCAW	EC410NiMo(Mod)	1,2-1,6	CCEP	190-240	Ajuste Amp	15 KJ/Cm	32-38	200-250																																																																																												
Corriente Pulsada <u>Recomendable en posición 3F y 3G</u> Temperatura Entrada (máx.). <u>15 kJ/cm</u> Tamaño y Tipo de Electrodo Tungsteno <u>No Aplica</u> (Tungsteno puro, Toriado al 2%, etc.) Modo Transferencia Metal para GMAW (FCAW) <u>1G, 2F: Spray / todas las otras: globular</u> (Arco Spray, Arco Cortocircuito, etc.) Rango Veloc. Aliment. Electrodo de Alambre <u>Conforme al ajuste de Amperaje</u> Otro: <u>No</u>																																																																																																					
TECNICA (QW-410) Cordón Chicoteado, Trabajado <u>Ambos</u> Diametro Orificio, boquilla o Copa de Gas <u>No Aplica</u> Limpieza Inicial e Interpaso (esmerilado, escobillado) <u>Amolado, cepillado Manual y Mecánico, usar herramienta para inoxidables</u> Método de Saneado de Respaldo <u>No Aplica</u> Oscilación <u>Aplica en relleno, cuidando no sobre pasar 15KJ/Cm</u> Distancia Contacto Tubo-Material <u>1"-1 1/2"</u> Multipaso o Simple Paso (por lado) <u>Múltiple</u> Electrodo Simple o Múltiple <u>Simple</u> Velocidad de Avance (Rango) <u>Según Tabla Arriba, respetando calor de entrada.</u> Espaciamiento de Electrodo <u>No aplicable</u> Martillado <u>No Permitido</u> Otros <u>Uso de procesos termicos QW-410.64</u> <u>No aplicable</u>																																																																																																					
Solo los documentos identificados como "Controlado" están bajo dicha condición. La última versión digital es la predominante ante la impresa  www.solco.cl																																																																																																					

Fuente: ASMAR V (2018), WPS ASTM A 743 CA-6NM.

3-6-2 Tratamiento térmico de reacondicionamiento

Los tratamientos térmicos aplicados en rodets son los siguientes:

a) Homogenización

El proceso de homogenización consiste en elevar a una alta temperatura el material para homogenizar por difusión su microestructura. Según la Norma ASTM A743 la temperatura para realizar el proceso es de 1010°C, aunque algunos autores recomiendan temperaturas entre 1030-1065°C, este material puede ser templado al aire o en aceite y debido a su alta templabilidad ocasionada por su composición química, ocurre la transformación martensítica aún con altos tiempos de enfriamiento (Rojas Marín, 2009).

b) Revenido y efecto de la austenita retenida

El revenido es un tratamiento térmico posterior al homogenizado y soldadura del material el cual tiene como propósitos fundamentales:

- Aliviar tensiones en el material.
- Reducir la cantidad de dislocaciones.
- Recristalizar y descomponer austenita retenida.
- Precipitar carburos y formar austenita estable.

El revenido del acero CA6NM se realiza a temperaturas superiores a la temperatura de inicio de la transformación a austenita, por lo que, durante el tratamiento parte del material se transforma en austenita, convirtiéndose en un revenido ínter crítico. A estas temperaturas se consigue la menor reducción de la resistencia a la tracción, con un simultáneo incremento de la resistencia al impacto como resultado de la disociación de la martensita y la influencia de austenita finamente dispersa que permanece después del enfriamiento (estabilizada por procesos de segregación).

Una característica importante de la austenita retenida, además de promover una disminución en la dureza, es suministrar al material un incremento en el coeficiente de expansión, por tanto, este puede ser utilizado en aplicaciones donde el material puede sufrir variaciones drásticas en la temperatura de operación. Se debe tener un control de esta austenita retenida para poder lograr un buen desempeño al momento de volver a su estado operativo. La presencia de esta austenita retenida se debe principalmente a dos fenómenos diferentes: transformación incompleta de la martensita y por tratamiento térmico inter crítico (Rojas Marín, 2009).

De acuerdo con la norma ASTM A-743 tabla 4 “repair welding requirements”, la temperatura recomendada para ejecutar el precalentamiento es entre 150 y 370 °C y la temperatura post soldadura es como mínimo 565 °C hasta 620°C.

3.7- Validación estrategia económica

Para la validación de la estrategia de análisis, se realizará un cuadro comparativo, el cual expone: los costos de mantenimiento asociados a la indisponibilidad de un rodete Pelton, y del uso de réplica metalográfica como técnica de análisis.

-Estrategia 1, esperar a que las cosas sucedan: los costos asociados son directamente asociados a la indisponibilidad del activo. El tiempo de reposición de la maquina en caso de falla no programada es de mínimo 390 días. Y el costo de indisponibilidad por día es de US\$271.200 el cual considera el costo de la tarifa diurna (12 horas) y tarifa nocturna (12 horas).

Tabla 3-7. Costos estrategia 1

ESTRATEGIA 1	MW POR TURBINA	VALOR ENERGIA / MW	HORAS	COSTO
Tarifa día	100	56	12	US\$ 67.200
Tarifa noche	100	170	12	US\$ 204.000
Costo de indisponibilidad por día			24	US\$ 271.200
Costo total estrategia 1			9.360	US\$105.768.000

Fuente: Elaboración propia (2024), estrategia económica.

-Estrategia 2, aplicación de réplica metalografía (1 al año); reparación y tratamiento térmico de reacondicionamiento: el costo de la réplica metalográfica es de US\$835.600 el cual considera el costo de la toma de muestra y análisis de laboratorio US\$22.000 y la energía no vendida durante la inspección que tiene una duración de 3 días US\$813.600. La reparación y tratamiento térmico de reacondicionamiento tiene un costo de US\$13.780.000 y considera los costos asociados a la energía no vendida durante el proceso de reparación el cual tiene una duración de 50 días US\$13.560.000. Y el trabajo de reparación y tratamiento térmico tiene un costo de US\$220.000.

Tabla 3-8. Costos estrategia 2

ESTRATEGIA 2		COSTO
Répica metalográfica	Toma de muestra y análisis de laboratorio	US\$22.000
	Indisponibilidad de 3 días por la inspección	US\$813.600
Reparación y tratamiento térmico de reacondicionamiento	Trabajo de reparación y tratamiento térmico	US\$220.000
	Energía no vendida durante el proceso de reparación con duración de 50 días	US\$13.560.000
Costo total estrategia 2		US\$1.055.600

Fuente: Elaboración propia (2024), estrategia económica.

-Estrategia 3, aplicación de réplica metalografía (1 al año); reparación y tratamiento térmico de reacondicionamiento aplicado durante el período de mantención de sistemas de generación ahorrando así el costo de la energía no vendida durante la inspección y reparación. Además, es posible contar con un rodete que se intercambie con el que se necesite reparar, el cual hoy en día existe, pero no está reacondicionado. El costo de la réplica metalográfica es de US\$22.000 que consiste en la toma de muestra y análisis de laboratorio. La reparación y tratamiento térmico de reacondicionamiento tiene un costo de US\$220.000. Teniendo un coste total final de US\$242.000.

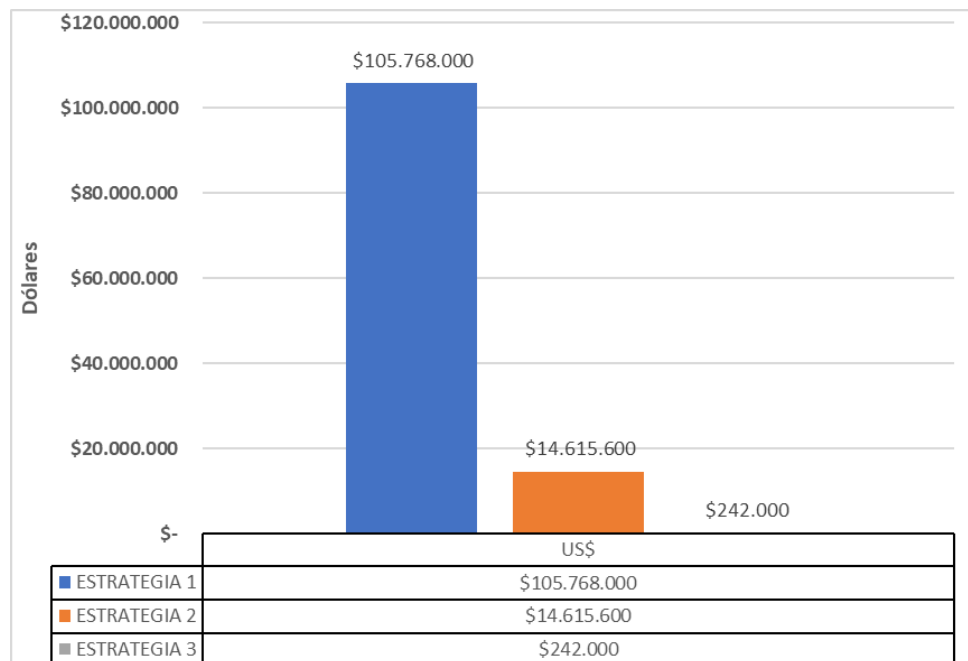
Tabla 3-9. Costos estrategia 3

ESTRATEGIA 3		COSTO
Réplica metalográfica	Toma de muestra y análisis de laboratorio	US\$22.000
Reparación y tratamiento térmico de reacondicionamiento	Trabajo de reparación y tratamiento térmico	US\$220.000
Costo total estrategia 3		US\$242.000

Fuente: Elaboración propia (2024), estrategia económica.

En la figura 3-8. Se expone un gráfico de barras comparativo de las tres estrategias anteriormente mencionadas.

Figura 3-8. Gráfico comparativo estrategias económicas.



Fuente: Elaboración propia (2024), estrategias económicas.

El mejor escenario es la estrategia 3, esta estrategia minimiza el tiempo de inactividad y evita los altos costos asociados con la pérdida de producción de energía durante cortes de energía no planificados. Teniendo un antecedente frente a una acción correctiva el costo económico ahorrado en mantenimiento es cerca de US\$100.000.000. Implementando el análisis metalográfico como herramienta de análisis de estrategia de mantenimiento proactivo basado en la condición, para finalmente eliminar el impacto económico de fallas no programadas.

CONCLUSIÓN

La importancia de la central hidroeléctrica El Toro se ve reforzada por el enorme volumen de regulación del lago Laja, que es cuatro veces superior al de las demás centrales hidroeléctricas del SEN. Esto garantiza la entrega de energía de forma segura, independientemente de las condiciones meteorológicas. Se analizó de forma detallada la turbina Pelton, distinguiendo su adaptabilidad a grandes saltos de agua y ofrecer varias ventajas, entre ellas, alta eficiencia, variaciones de caudal, bajos requisitos de mantenimiento, tolerancia a la mala calidad del agua y una larga vida útil. Se estudio las fallas tradicionales en las turbinas tipo Pelton en base a diversos autores que en común apuntan a que el: desgaste, cavitación y fatiga de material son los problemas tradicionales para este tipo de turbinas.

Luego, se identificaron y priorizaron los modos de falla de la turbina Pelton en función de su “Riesgo Total Anualizado” (RTA), según el libro “Técnicas de Análisis Causa Raíz (ACR)”. Con esto se orienta el esfuerzo de trabajo a los de mayor impacto, en este caso la fatiga de material por lo que se le dará prioridad en el análisis a corto plazo al rodete de la turbina Pelton. La técnica de análisis utilizada será la réplica metalográfica, complementándola con el análisis de microdureza por ultrasonidos, que permite evaluar el estado actual del material en cada uno de los rodetes.

Se demuestra que el análisis microestructural por réplicas metalográficas es una herramienta valiosa para el mantenimiento proactivo de rodets de turbina Pelton, entrega información detallada sobre la microestructura del material, permitiendo detectar defectos como grietas, porosidad, segregaciones y tamaño de grano. La implementación de este método puede contribuir a prevenir fallas no programadas, reducir costos de mantenimiento, mejorar la confiabilidad y la vida útil de las unidades generadoras. La creación de la matriz de estrategia de mantenimiento desarrollada proporciona un marco integral para identificar y abordar posibles fallas antes de que ocurran, minimizando así el impacto económico de las paradas no planificadas. Los aspectos económicos asociados a la implementación del mantenimiento proactivo basado en la condición propuesto, destaca el ahorro de US\$100.000.000 en comparación con estrategias de mantenimiento reactivo utilizadas.

Se verifico la condición actual del material del rodete de las turbinas tipo Pelton mediante réplica metalográfica. Se elaboró una matriz de decisión con parámetros y referencias normativas. Esto permitió determinar la estrategia de mantenimiento, entre proactivo mediante metalografías, reparaciones estandarizadas o remplazo definitivo del rodete por uno nuevo, para así contribuir a la confiabilidad operacional y un futuro energético sostenible.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM. (2012). *ASTM A487-Standard specification for steel castings suitable for pressure services.*

ASTM International. (2003). *ASTM E 1351-01 Standard practice for production and evaluation of field metallographic replicas.*

ASTM International. (2004). *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures.*

AWS. (2019). *Welding Handbook*

Rojas Marín, J. V. (2009). *Identificación y cuantificación de las fases en acero inoxidable ASTM A743 grado CA6NM mediante técnica de difracción de rayos x.* Universidad Nacional de Colombia

Briceño, E., Escobar, R., & Ramírez, S. (2008). *Manual de capacitación en operación y mantenimiento de pequeñas centrales hidráulicas.*

Carlos Parra y Adolfo Crespo (2021). *Técnicas de Análisis Causa Raíz*

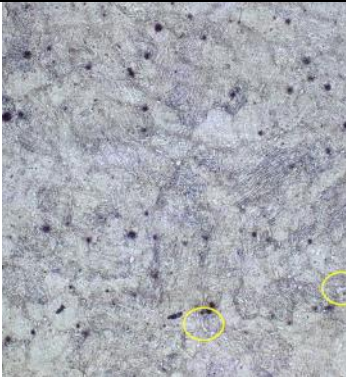
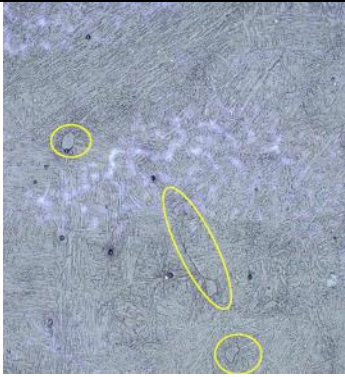
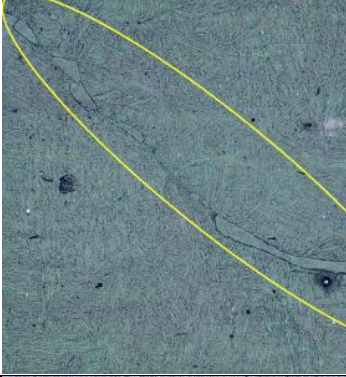
Manual de la Central Hidroeléctrica El Toro

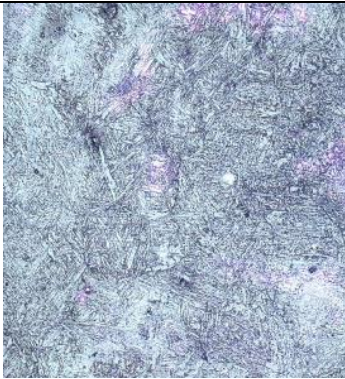
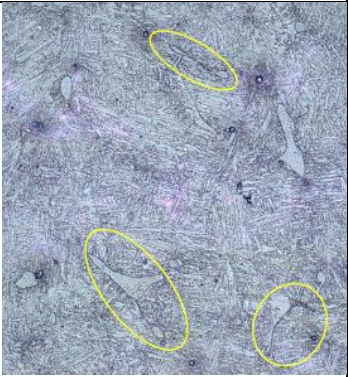
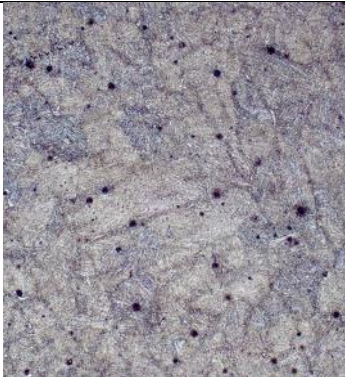
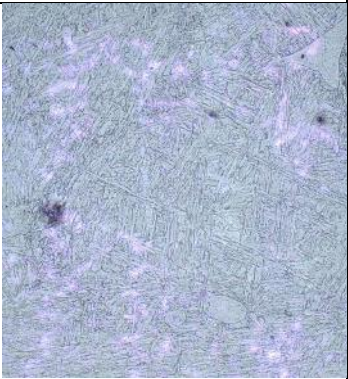
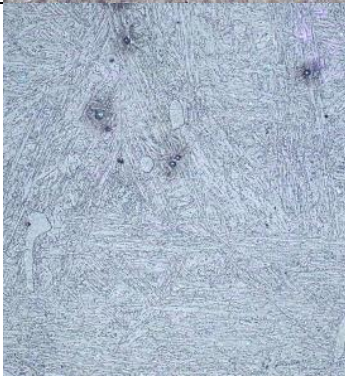
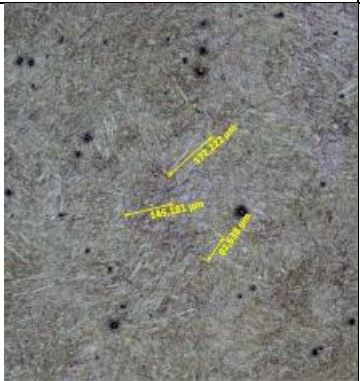
Ulises Quispe Yale (2018). *Análisis de fallas funcionales del sistema turbina-generator*

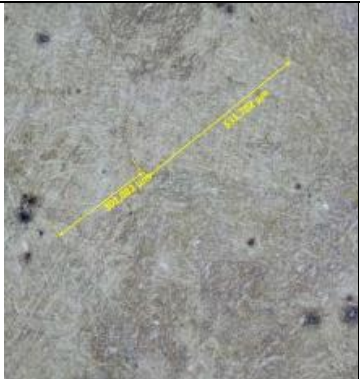
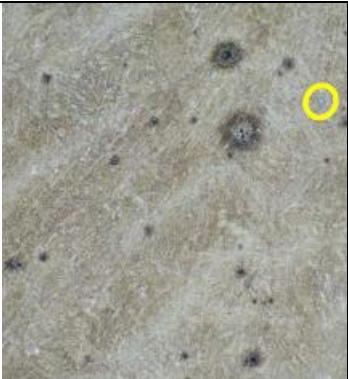
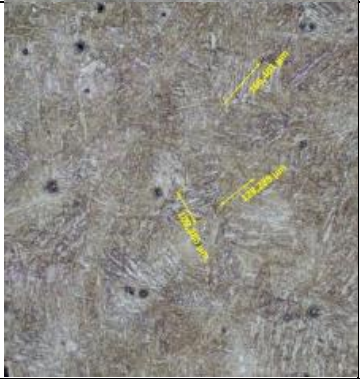
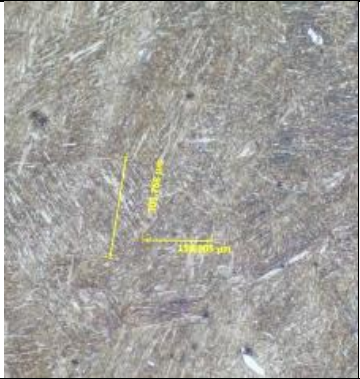
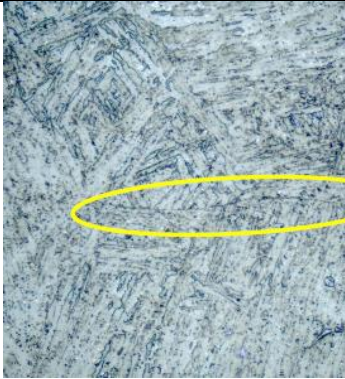
Vivero, C., & Hugo, M. (2019). *Análisis de la microestructura en los rodets pelton de la central hidroeléctrica Paute-Molino mediante réplicas metalográficas in situ*

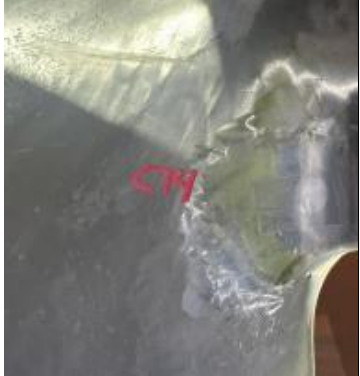
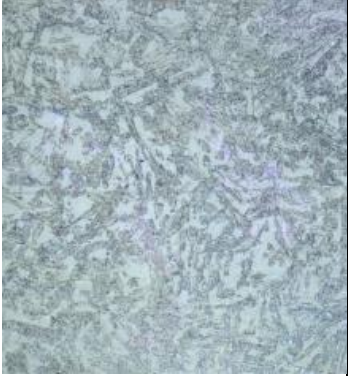
ANEXOS

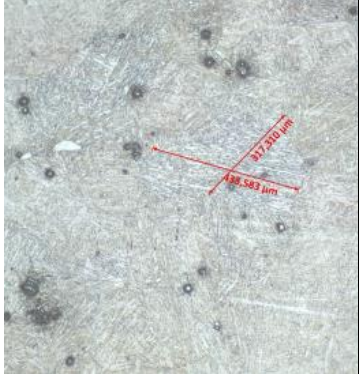
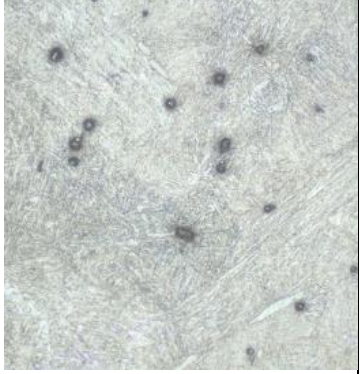
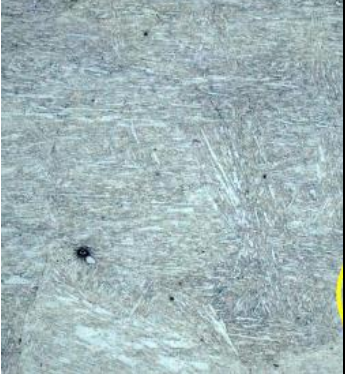
Anexo 1: Replicas metalográficas cuatro rodets central El Toro

Rodete	Punto	Imagen	Imagen	Imagen
1	5.1			
1	5.2			
1	8.1			

1	8.2			
1	19.1			
1	19.2			
2	C5			

2	C9			
2	C16			
2	C20			
3	C3			

3	C7			
3	C1 4			
3	C1 8			
4	C1			

4	C5			
4	C17			
4	C20			

Anexo 2: Procedimiento de soldadura WPS MCAW Hard Facing 001



QW-482 FORMATO SUGERIDO
ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)
 (QW-200.1, Código ASME Sección IX Calderas y Recipientes a Presión).

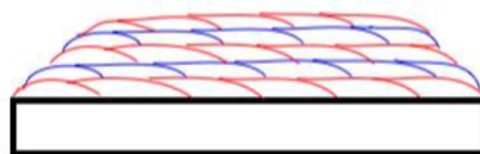
Nombre de Compañía: Astilleros y maestranzas de la Armada Por: Carlos A Vergara B
 Espec. de Procedimiento N°: WPS-MCAW-Hard-Facing-001 Fecha 07-10-2018 Revisión N° A.2
 Soportado por PQR N° PQR-MCAW-Hard-Facing-001 Fecha _____
 Procesos de Sold. FCAW (MCAW) Tipo (s) Manual

UNIONES (QW-402)

Diseño Unión De acuerdo con plano de fabricacion
 Abertura de Raíz Si fuera necesario : 0 to 3 mm.(+1)
 Respaldo Si X o No X
 Material Respaldo (tipo) Metal de soldadura - o - P 1
Referir a ambos respaldo y retenedor

Sin Retenedores	<u>X</u>	Con Retenedores	<u>X</u>
-----------------	----------	-----------------	----------

Detalles



Bosquejos, Planos de Producción, Símbolos de Soldadura o la descripción escrita deben mostrar la disposición general de piezas que serán soldadas. Donde aplique, se especificaran el espaciado de raíz y los detalles del bisel de soldadura.

[A opción del fabricante, los bosquejos se pueden anexar para ilustrar diseño de la junta, pasadas de soldadura y secuencia de pasadas (e.g. para los procedimientos de tenacidad por entalla, para procedimientos de proceso múltiples, etc)].

Todos los valores en milímetros

METALES BASE (QW-403)

P.N° 6 Grupo N° 4 a P N° 6 Grupo N° 4
 Especificación y Tipo / Grado o Número UNS ASTM A 743 CA-6NM
 a Especificación y Tipo / Grado o Número UNS ASTM A 743 CA-6NM
 Análisis Químico y Propiedades Mecánicas _____
 a Análisis Químico y Propiedades Mecánicas _____
 Rango de Espesores Metal Base: de Tope hasta 25 mm (1 Inch-) Filete Todos
 Espesor Máximo de Pasada de Soldadura ≤ 13 mm
 Otros No

METALES DE APORTE (QW-404)

Especif. N° (SFA)	5.22			
Clasificación AWS	EC410NiMo (mod.)			
F. N°	6			
A.N°	No asignado			
Tamaño Metal Aporte Ø)	1,2 - 1,6 mm			
Forma Producto Metal Aporte	Tubular			
Metal Aporte Suplementario	No			
Metal de Soldaduras				
Rango de Espesor Unión Tope	hasta 25,0 mm			
Rango de Espesor Unión Filete	Todos			
Clasif. Electrodo-Fundente	No aplicable			
Tipo de Fundente	No aplicable			
Marca Fundente	No aplicable			
Inserto Consumible	No aplicable			
Otros	No			

Cada combinación de Metal base - Metal de Aporte deberá ser registrado individualmente.

Solo los documentos identificados como "Controlado" están bajo dicha condición. La última versión digital es la predominante ante la impresa



QW-482 PAGINA TRASERA
ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)
(QW-200.1, Código ASME Sección IX Calderas y Recipientes a Presión).

Espec. de Procedimiento N°: WPS-MCAW-Hard-Facing-001 Fecha 07-10-2018 Revisión N° A.2

POSICIONES (QW-405)

Posiciones de Bisel 1G-2G-3G, 1F, 2F, 3F
Progresión Soldadura Ascendt. ☒ Descendt. ☒
Posiciones de Filete Todos
Otro: No aplicar en posición Sobre Cabeza

TRATAMIENTO TERMICO POSTSOLDADURAS (QW-407)

Rango de Temperaturas 580° a 620°C
Rango de Tiempo 1 hora / pulgada de espesor
Otro: Se recomienda control de dureza y microestructura

PRECALENTAMIENTO (QW-406)

Tem. Precalen. Mín. 100- 160°C máx.
Tem. Interpaso Máx. 100-160°C máx.
Mant. Precalent. Enfriamiento -50°/hora
Otro: Las temperaturas deben ser revisadas al recuperar una turbina completa
(Temperatura continúa o especial, donde aplique, debe ser registrada).

GAS (QW-408)

Protección	Porcentaje de Composición		
	Gas(es)	Mezcla (%)	Flujo (lpm)
Arrastre	-----	Ar+2%CO2	8 - 14
Respaldo	-----	-----	-----
Otro	-----	-----	-----

CARACTERISTICAS ELECTRICAS (QW-409)

N° Paso Sold.	Proceso	Metal Aporte		Corriente		Veloc. Aliment. Alambre Rango	Calor de aporte máximo	Voltaje Rango	Rango Velocidad Avance mm/min	Otros (Observaciones, comentarios, adición de temperatura al alambre, técnica, ángulo del soplete, etc)
		Clasific.	Diam. mm	Tipo y Polaridad	Amp. Rango					
1	FCAW	EC410NiMo(Mod)	1,2	CCEP	180-230	Ajuste Amp	15 KJ/Cm	30-35	180-230	Velocidad avance, debe ser tal que al calcular por ecuación de Calor de Entrada no sea mayor al valor requerido.
2	FCAW	EC410NiMo(Mod)	1,2-1,6	CCEP	190-240	Ajuste Amp	15 KJ/Cm	32-38	200-250	
3	FCAW	EC410NiMo(Mod)	1,2-1,6	CCEP	190-240	Ajuste Amp	15 KJ/Cm	32-38	200-250	
4 a N	FCAW	EC410NiMo(Mod)	1,2-1,6	CCEP	190-240	Ajuste Amp	15 KJ/Cm	32-38	200-250	

Los rangos de Amperaje y Voltaje deben ser registrados por cada tamaño de electrodo, posición y espesor, etc.

Corriente Pulsada Recomendable en posición 3F y 3G Temperatura Entrada (máx.). 15 kJ/cm
Tamaño y Tipo de Electrodo Tungsteno No Aplica
(Tungsteno puro, Toriado al 2%, etc.)
ModoTransferencia Metal para GMAW (FCAW) 1G, 2F: Spray / todas las otras: globular
(Arco Spray, Arco Cortocircuito, etc.)
Rango Veloc. Aliment. Electrodo de Alambre Conforme al ajuste de Amperaje
Otro: No

TECNICA (QW-410)

Cordón Chicoteado, Trabajado Ambos
Diámetro Orificio, boquilla o Copa de Gas No Aplica
Limpieza Inicial e Interpaso (esmerilado, escobillado) Amolado, cepillado Manual y Mecánico, usar herramienta para inoxidables
Método de Saneado de Respaldo No Aplica
Oscilación Aplica en relleno, cuidando no sobre pasar 15KJ/Cm
Distancia Contacto Tubo-Material 1"-1 1/2"
Multipaso o Simple Paso (por lado) Multiple
Electrodo Simple o Multiple Simple
Velocidad de Avance (Rango) Según Tabla Arriba, respetando calor de entrada.
Espaciamiento de Electrodo No aplicable
Martillado No Permitido
Otros Uso de procesos termicos QW-410.64 No aplicable

Solo los documentos identificados como "Controlado" están bajo dicha condición. La última versión digital es la predominante ante la impresa

