

**DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO TÉCNICO PARA
LA REHABILITACIÓN DE UN RODETE FRANCIS EN UNA
PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE 15 MW**



**Universidad
del Valle**

Director

José Isidro García Melo, PhD.

Estudiante

Pedro Miguel Salgado Ramírez

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI**

2025

CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	9
2. ÁRBOL DEL PROBLEMA	12
3. MARCO TEÓRICO.....	14
3.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	14
3.1.1 TINTAS PENETRANTES	14
3.1.2 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.....	14
3.1.3 ULTRASONIDO	15
3.2 ALIVIO TÉRMICO	15
3.3 BALANCEO DINÁMICO	16
3.4 ESPECIFICACIÓN CCH 70-4.....	16
3.5 RODETE FRANCIS.....	19
4. OBJETIVOS.....	20
4.1 OBJETIVO GENERAL	20
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
5. METODOLOGIA.....	20
5.1. REQUERIMIENTOS.....	20
5.1.1. INSPECCIÓN VISUAL.....	21
5.1.2. END DE RECEPCIÓN.....	22
5.1.3. MUESTREO DE DUREZAS	23
5.1.4. METROLOGÍA CONVENCIONAL DE RECEPCIÓN.....	24
5.2. PROCEDIMIENTO	25
5.2.1. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DETECTADOS POR MEDIO DE LAS INSPECCIONES REALIZADAS ANTERIORMENTE.....	26
5.2.2. CUANTIFICACIÓN DEL DESGASTE EN EL RODETE.....	27
5.2.3. DEFINIR MÉTODO PARA RECONSTRUIR GEOMETRÍAS COMPLEJAS.....	28
5.3. APLICACIÓN.....	29
5.3.1. ELIMINACIÓN DE DISCONTINUIDADES	30
5.3.2. APLICACIÓN DE SOLDADURA	31
5.3.3. FABRICACIÓN DE PLANTILLAS	33
5.3.4. MECANIZADO FINAL	34
5.3.5. PULIDO DE GEOMETRÍAS COMPLEJAS.....	35
5.3.6. BALANCEO DINÁMICO.....	36

5.4. COMPROBACIÓN.....	37
5.4.1. INSPECCIÓN VISUAL FINAL	37
5.4.2. END FINALES	38
5.4.3. MUESTREO DE DUREZAS FINAL	39
5.4.4. METROLOGÍA FINAL	40
5.5. ENTREGABLES	41
5.5.1. DIAGNÓSTICO INICIAL E INSPECCIONES DE RECEPCIÓN.....	42
5.5.2. ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE REPARACIÓN	42
5.5.3. IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE REHABILITACIÓN	43
5.5.4. VALIDACIÓN Y ENTREGA DEL COMPONENTE REHABILITADO	44
5.6. IMPACTOS ESPERADOS	45
5.6.1. TÉCNICO	45
5.6.2. AMBIENTAL	48
6. CASO PARTICULAR	52
6.1. REQUERIMIENTOS.....	52
6.1.1. INSPECCIÓN VISUAL INICIAL	52
6.1.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE RECEPCIÓN	54
6.1.3. MUESTREO DE DUREZAS DE RECEPCIÓN	57
6.1.4. METROLOGÍA DE RECEPCIÓN	57
6.1.5. ENTREGABLES REQUERIMIENTOS	58
6.2. PROCEDIMIENTO	62
6.2.1. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DETECTADOS POR MEDIO DE LAS INSPECCIONES REALIZADAS ANTERIORMENTE.....	62
6.2.2. CUANTIFICACIÓN DEL DESGASTE EN EL RODETE	62
6.2.3. DEFINIR MÉTODO PARA RECONSTRUIR GEOMETRÍAS COMPLEJAS	63
6.2.4. ENTREGABLES FASE DE PROCEDIMIENTO	64
6.3. APLICACIÓN.....	65
6.3.1. ELIMINACIÓN DE DISCONTINUIDADES	65
6.3.2. APLICACIÓN DE SOLDADURA	66
6.3.3. FABRICACIÓN DE PLANTILLAS	69
6.3.4. MECANIZADO FINAL	70
6.3.5. PULIDO DE GEOMETRÍAS COMPLEJAS	71
6.3.6. BALANCEO DINÁMICO	73
6.3.7. ENTREGABLES APLICACIÓN	73
6.4. COMPROBACIÓN	75
6.4.1. INSPECCIÓN VISUAL FINAL	75
6.4.2. END FINALES	75
6.4.3. MUESTREO DE DUREZAS DE LIBERACIÓN	77
6.4.4. METROLOGÍA DE LIBERACIÓN	78
6.4.5. ENTREGABLES COMPROBACIÓN	78
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
8. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Árbol del problema.	13
Figura 3.7.2. Criterio de aceptación clase 3 END-PT. [18].	18
Figura 6.3.1.1. Zonas rodete.	53
Figura 6.1.1.4. Desgaste por abrasión en zona extradós rodete.	53
Figura 6.1.1.5. Desgaste por abrasión en zona intradós rodete.	54
Figura 6.1.5.6. Sección de informe END-UT.	60
Figura 6.1.5.7. Sección de informe END-Durezas.	61
Figura 6.1.5.8. Sección de informe metrologías.	61
Figura 6.2.4.1. Sección de informe mapeo de defectos.	64
Figura 6.2.4.2. Sección de informe diagnóstico inicial.	65
Figura 6.3.1.1. Preparación superficial.	66
Figura 6.3.2.1. Intervención soldada por medio de SMAW con soldador calificado.	68
Figura 6.3.2.2. Momento previo al alivio de tensiones.	69
Figura 6.3.3.1. Malla generada por el escaneo 3D del rodete.	69
Figura 6.3.3.2. Plantilla alabe zona extradós.	70
Figura 6.3.4.1. Mecanizado final del rodete.	71
Figura 6.3.5.1. Verificación geométrica por plantillas.	72
Figura 6.3.5.2. Rodete con acabado final.	72
Figura 6.3.6.1. Balanceo dinámico.	73
Figura 6.3.7.1. Informe partículas magnéticas.	73
Figura 6.3.7.2. WPS para soldadura.	74
Figura 6.3.7.3. Informe balanceo dinámico.	74
Figura 6.4.2.1.1. Ensayo de tintas penetrantes en el rodete.	75
Figura 6.4.2.2.1. Ejecución de partículas magnéticas.	76
Figura 6.4.2.3.1. Grafica por ultrasonido de espesores	76
Figura 6.4.3.1. Muestreo de durezas en zona extradós del rodete.	77
Figura 6.4.5.1. Sección de informe inspección visual.	78
Figura 6.4.5.2. Sección de informe END-PT.	79
Figura 6.4.5.3. Sección de informe END-MT.	79
Figura 6.4.5.4. Sección de informe END-UT.	80
Figura 6.4.5.5. Sección de informe durezas.	80
Figura 6.4.5.6. Sección de informe metrología.	81

RESUMEN

El presente proyecto desarrolla un procedimiento técnico para la rehabilitación de un rodete Francis perteneciente a una pequeña central hidroeléctrica con capacidad de 15 MW, orientado a garantizar la integridad estructural, la eficiencia hidráulica y la prolongación de la vida útil del componente. En este contexto energético colombiano, donde más del 70 % de la generación eléctrica proviene de fuentes hídricas, las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) representan una alternativa esencial para el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico. Sin embargo, la operación continua en condiciones de alta carga y la exposición a partículas abrasivas, cavitación y fenómenos de fatiga mecánica generan un deterioro acelerado del rodete, componente clave en la conversión de energía hidráulica en energía mecánica. El proyecto plantea la formulación de un procedimiento estandarizado de rehabilitación que integre prácticas de inspección acorde a la especificación CCH 70-4, soldadura utilizando WPS (welding procedure specification), PQR (procedure qualification record) y WPQ (welder performance qualification) y mecanizado, aplicable a componentes de turbinas Francis. El enfoque metodológico comprende cuatro fases principales: inspección inicial mediante ensayos no destructivos y metrología; determinación de zonas críticas de desgaste; reconstrucción geométrica mediante procesos de soldadura controlada y mecanizado de precisión; y validación final del componente rehabilitado mediante inspecciones y mediciones comparativas.

El procedimiento propuesto busca servir como guía técnica replicable para la industria nacional, reduciendo la dependencia de la importación de impulsores nuevos y optimizando los tiempos de mantenimiento. Asimismo, se espera contribuir a la consolidación de prácticas documentadas en rehabilitación de rodetes, fortaleciendo la capacidad operativa de empresas del sector energético e impulsando la sostenibilidad ambiental mediante la reducción de desechos metálicos.

Palabras clave: *Rodete Francis, pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), rehabilitación, ensayos no destructivos (END), metodología, soldadura.*

ABSTRACT

This project develops a technical procedure for the rehabilitation of a Francis runner belonging to a small hydroelectric plant with a capacity of 15 MW, aimed at ensuring structural integrity, hydraulic efficiency, and extended service life. In Colombia's energy context, where over 70% of electricity generation relies on hydropower, small hydroelectric plants (SHPs) play a critical role in sustainable water resource use. However, continuous operation under high loads and exposure to abrasive particles, cavitation, and mechanical fatigue accelerate the deterioration of the runner, a key component in the conversion of hydraulic to mechanical energy.

The research proposes the formulation of a standardized rehabilitation procedure integrating inspection, welding, and machining practices under the guidelines of the CCH70-4 standard, applicable to Francis turbine components. The methodological framework includes four main stages: initial inspection using non-destructive testing and metrology; identification of critical wear zones; geometric reconstruction through controlled welding and precision machining; and final validation through comparative inspections and measurements.

The proposed procedure is intended to serve as a replicable technical guide for national industry, reducing dependency on imported runners and optimizing maintenance times. It also contributes to the documentation of rehabilitation practices, strengthens the operational capacity of the energy sector, and promotes environmental sustainability through the reduction of metallic waste.

Keywords: *Runner Francis; small hydroelectric plants (SHP), rehabilitation, non-destructive testing (NDT), methodology, welding.*

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento del potencial hidroenergético constituye uno de los pilares de la matriz eléctrica colombiana, según los reportes del Ministerio de Minas y Energía, más del 70 % de la generación eléctrica nacional proviene de fuentes hídricas [1], lo que posiciona a las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) como actores estratégicos para el suministro energético regional y el desarrollo sostenible de comunidades rurales; estas instalaciones, con capacidades unitarias inferiores a los 20 MW, permiten aprovechar caudales medianos y garantizar estabilidad en zonas donde la interconexión eléctrica es limitada [2]. Por lo tanto, el mantenimiento de sus componentes hidráulicos, en especial el rodete Francis, representa un desafío técnico relevante por las condiciones de operación y el costo de reemplazo de piezas importadas.

El rodete Francis es un elemento principal en la conversión de la energía hidráulica en energía mecánica, el cual con una geometría compleja, que combina un diseño radial-axial con álabes curvos, permite obtener un alto rendimiento en un amplio rango de cargas. No obstante, durante su funcionamiento se encuentra expuesto a fenómenos de cavitación, abrasión, corrosión y fatiga, que ocasionan erosión localizada y pérdida de eficiencia hidráulica, así es como la presencia de partículas sólidas en el flujo, junto con variaciones de presión y temperatura, incrementa la probabilidad de fisuras superficiales y deformaciones plásticas, comprometiendo la seguridad operativa del equipo [7]. Estas fallas, de no atenderse oportunamente o de manera inadecuada, pueden derivar en paradas prolongadas y pérdidas económicas significativas para las empresas generadoras.

En el contexto colombiano, la rehabilitación de rodetes suele depender de talleres especializados en el extranjero [21], lo que incrementa los tiempos de entrega y los costos asociados a la logística y el reemplazo de componentes, además, la limitada documentación de procedimientos estandarizados de reparación dificulta la

trazabilidad técnica y la validación de la calidad del proceso. Por esta razón, se hace necesario establecer un protocolo metodológico adaptado a las capacidades industriales nacionales, que garantice la fiabilidad del componente reparado y reduzca la dependencia de servicios externos.

El presente proyecto propone el desarrollo de un procedimiento técnico para la rehabilitación de un rodete Francis perteneciente a una PCH de 15 MW, con base en la experiencia de campo y los lineamientos de la especificación CCH70-4, aplicable a componentes hidráulicos de turbinas, dicho procedimiento integra etapas de inspección, soldadura y mecanizado de precisión, con el objetivo de recuperar las dimensiones originales del rodete y asegurar su desempeño dentro de los márgenes establecidos por el fabricante, dado que, la metodología contempla el uso de ensayos no destructivos (END) para la detección de discontinuidades, mediciones metrológicas comparativas y controles de dureza que permitan verificar la integridad del material antes y después de la reparación.

Desde el punto de vista técnico, el proyecto busca aportar una guía replicable que pueda ser utilizada por empresas de mantenimiento y fabricación metalmecánica dedicadas al sector hidroenergético. Desde la perspectiva académica e industrial, la investigación contribuye a la consolidación de conocimiento práctico sobre la rehabilitación de componentes hidráulicos, fortaleciendo las competencias profesionales en ingeniería mecánica y fomentando la aplicación de normas internacionales en procesos industriales locales.

En síntesis, la introducción de un procedimiento estandarizado de rehabilitación permitirá mejorar los tiempos de mantenimiento, mejorar la disponibilidad operativa de las PCH y promover la sostenibilidad mediante la reducción de desechos metálicos, pues de esta manera, el proyecto se alinea con los principios de eficiencia energética, innovación tecnológica y aprovechamiento responsable de los recursos hídricos en el país.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente, el sistema energético nacional se sustenta en un 74 % de la generación eléctrica a partir de recursos hídricos [1], pues en el territorio colombiano se emplean principalmente dos tipos de centrales hidroeléctricas: las de embalse y las de filo de agua [2]; las primeras se caracterizan por almacenar grandes volúmenes de agua mediante presas para regular el caudal disponible y garantizar la generación continua; mientras que las segundas —conocidas como pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH)— aprovechan directamente la energía potencial del afluente, sin almacenamiento significativo, para producir electricidad, todas estas PCH presentan una capacidad instalada que oscila entre 0,5 y 20 MW, lo que las convierte en una alternativa eficiente para la generación descentralizada en zonas rurales [2].

En este tipo de instalaciones, el desgaste de los componentes mecánicos constituye uno de los principales factores de pérdida de rendimiento, dado que el flujo de agua contiene sólidos en suspensión y sufre variaciones de presión y velocidad, los elementos hidráulicos están expuestos a mecanismos de degradación simultáneos, entre los que destacan la corrosión, abrasión y fatiga mecánica, en sintonía con esto la corrosión, especialmente en las palas del rodete, representa un riesgo importante para la confiabilidad del sistema, ya que la composición química del acero inoxidable o de las aleaciones utilizadas influye directamente en su resistencia al ataque químico. En esta línea, el estudio de Ciocoiu et al. resalta la importancia de la selección de materiales en la durabilidad de los componentes hidráulicos, destacando que una inadecuada elección de aleaciones puede acelerar la pérdida de espesor y comprometer la eficiencia de la turbina [3]. Asimismo, las vibraciones inducidas por las fuerzas hidráulicas constituyen un fenómeno crítico que puede acelerar el proceso de fatiga en los componentes sometidos a cargas alternantes, diversas investigaciones recientes indican que una parte considerable de las fallas estructurales en sistemas

de generación hidroeléctrica se relaciona con vibraciones originadas por desequilibrios dinámicos y perturbaciones del flujo [4], causando efectos que se intensifican con la presencia del golpe de ariete, generado por variaciones abruptas en la velocidad del fluido, lo que produce sobrepresiones que impactan negativamente la estabilidad estructural de los rodetes [5].

Dentro del conjunto de componentes de la turbina Francis, el rodete o impulsor desempeña un papel determinante al transformar la energía hidráulica en energía mecánica, de acuerdo con Ayancik et al., el rodete reduce la presión y el momento angular del flujo, generando potencia a partir de la interacción entre las palas y el agua [6]. Sin embargo, al estar expuesto de forma continua a altas velocidades y presiones variables, el rodete es particularmente susceptible a daños por cavitación y abrasión, lo que afecta su rendimiento y vida útil.

La cavitación se produce cuando la presión local del fluido desciende por debajo de la presión de vapor, generando burbujas que colapsan violentamente sobre la superficie metálica, cuyo fenómeno causa erosión severa, especialmente en las zonas de succión y bordes de fuga de las palas, alterando la geometría original y disminuyendo el rendimiento hidráulico de la turbina, tal como lo señalan Ylönen et al. [7][8], y a su vez, la abrasión provocada por partículas sólidas en el flujo incrementa el desgaste superficial y deteriora progresivamente la eficiencia operativa [9].

Desde el punto de vista económico la fabricación o importación de nuevos impulsores representa un desafío logístico y económico significativo para el sector hidroenergético nacional, los tiempos prolongados de importación y los altos costos asociados a la manufactura de precisión hacen que la reposición de un rodete completo resulte poco viable para pequeñas centrales. En este contexto, la recuperación dimensional mediante soldadura y mecanizado surge como una alternativa técnica viable, que permite restablecer la geometría y prolongar la vida útil del componente, pese a ello, esta técnica exige una rigurosa aplicación de

controles de calidad para evitar defectos metalúrgicos que puedan comprometer la integridad estructural del rodete o alterar su comportamiento hidráulico.

Diversos estudios respaldan que los procesos de reparación por soldadura pueden extender significativamente la vida útil de los componentes metálicos, siempre que se controlen parámetros como la energía de aporte, la selección de consumibles, la temperatura entre pasadas y el tratamiento térmico posterior [10][11]. De lo contrario, la presencia de tensiones residuales, porosidades o zonas de sobrecalentamiento puede derivar en debilitamientos estructurales que reduzcan la confiabilidad del componente [12][13]. Paralelamente, los avances en manufactura —como la fabricación de impulsores mecanizados en una sola pieza— ofrecen soluciones más modernas y precisas, aunque aún implican altos costos de inversión y requieren de tecnologías que no están ampliamente disponibles en el país [14][15][16].

Desde un punto de vista funcional, el rodete se encuentra acoplado directamente al eje del generador, transmitiendo la potencia mecánica derivada del flujo hidráulico, y causando el acoplamiento, implicando que cualquier deformación o pérdida de balanceo afecta de forma directa la operación del sistema. Por tanto, establecer un procedimiento de reparación y rehabilitación que asegure la integridad estructural, la restauración geométrica y la conformidad con los estándares industriales constituye una medida prioritaria para garantizar la continuidad operativa de las PCH y reducir los costos de mantenimiento.

En consecuencia, el presente proyecto justifica su pertinencia técnica en la necesidad de estandarizar y documentar un procedimiento de rehabilitación del rodete Francis que combine las etapas de inspección, soldadura, mecanizado y verificación final, bajo criterios de calidad y seguridad industrial. Este procedimiento permitirá fortalecer la autonomía técnica del sector energético colombiano, optimizando la disponibilidad de equipos, reduciendo los tiempos de parada y promoviendo prácticas sostenibles en la gestión del mantenimiento preventivo y correctivo de los componentes mecánicos hidráulicos.

2. ÁRBOL DEL PROBLEMA

El análisis de la situación técnica y operativa de las pequeñas centrales hidroeléctricas permitió identificar que el problema central se concentra en la *carencia de procedimientos estandarizados para la reparación de rodetes Francis en PCH*. Esta ausencia de protocolos definidos genera una brecha significativa entre la práctica de mantenimiento local y los estándares internacionales de rehabilitación de componentes hidráulicos.

Entre las causas principales de esta problemática se destaca la limitada integración de normas técnicas que orienten los procesos de recuperación, inspección y control de calidad de los rodetes, a pesar de la existencia de normas internacionales aplicables, tales como la: CCH70-4 o las especificaciones ASTM para ensayos y soldadura, su aplicación en el contexto colombiano es escasa debido a la falta de adaptación a las capacidades industriales locales.

Asimismo, se evidencia una escasa disponibilidad de información técnica documentada sobre procedimientos de reparación, selección de materiales de aporte, parámetros de soldadura o tolerancias dimensionales, impidiendo establecer criterios uniformes de aceptación y control durante el proceso de rehabilitación, sumándose a la carencia de manuales o guías especializadas generando dependencia de la experiencia empírica del personal técnico, lo cual introduce variabilidad en la calidad final del trabajo.

Otra causa relevante corresponde a la inadecuada implementación técnica, asociada a la falta de capacitación en procesos especializados de soldadura y mecanizado para componentes hidráulicos, lo cual en muchos talleres metalmecánicos no se dispone de procedimientos calificados ni de documentación de respaldo que garantice la trazabilidad y la integridad estructural del rodete reparado.

Finalmente, la limitada integración de normas especializadas en los criterios de aceptación provoca incertidumbre en la validación de las reparaciones, dificultando la certificación del componente antes de su reinstalación. Esta deficiencia impide evaluar de manera objetiva la calidad del proceso y la confiabilidad del rodete rehabilitado.

Las consecuencias directas de este escenario se manifiestan en desgastes acelerados, reducción de la eficiencia del conjunto turbina-generador y, en casos críticos, fallas catastróficas que pueden comprometer la seguridad de la central y generar paradas prolongadas. En la Figura 2.1 se representa de forma esquemática esta relación causal, donde las causas técnicas y documentales se vinculan con los efectos operativos que afectan la sostenibilidad y disponibilidad de las PCH.

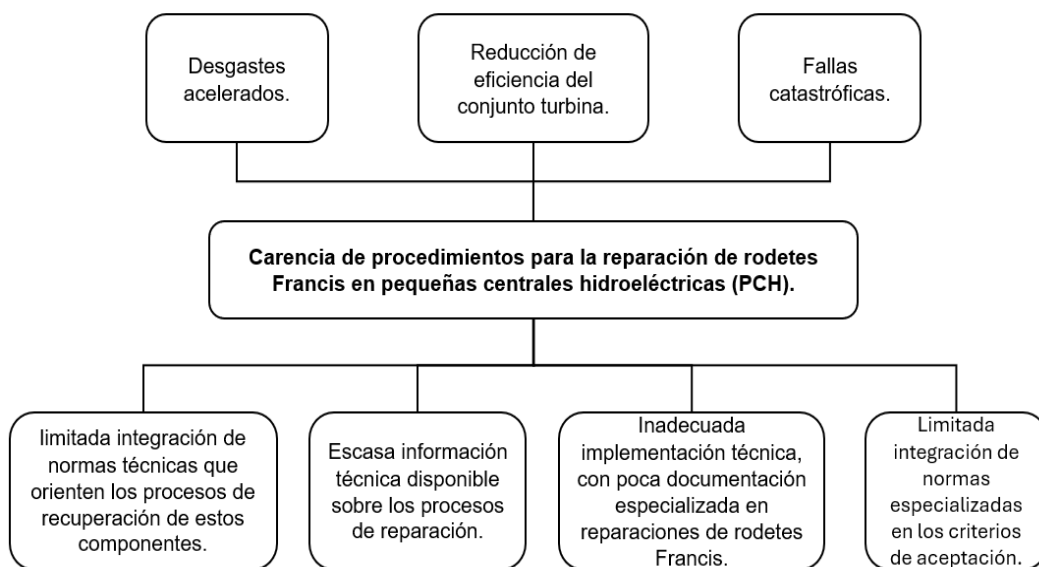


Figura 1. Árbol del problema.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos (END) se definen como métodos de evaluación que permiten identificar defectos o irregularidades en materiales, ensamblajes o estructuras, sin alterar de forma permanente su forma ni propiedades [17]. Este enfoque resulta esencial en sectores críticos como la industria automotriz, la aeronáutica y la infraestructura. El cumplimiento de estándares es indispensable para garantizar la calidad de las inspecciones. Normativas como la ISO/IEC 17025 aseguran la confiabilidad de los laboratorios que realizan estas pruebas. Además, la implementación de acuerdos de protección de calidad, como los dictados por la IEEE, la ASTM Y la CCH70-4 sustenta la reproducibilidad de los ensayos y promueve la uniformidad en las prácticas globales.

3.1.1 TINTAS PENETRANTES

Las tintas penetrantes son un tipo de ensayo no destructivo. Se utiliza para detectar defectos abiertos a la superficie [18]. Este método funciona en cuatro pasos: Se debe limpiar bien la superficie donde se realizará el ensayo, debe estar libre de grasas y mugre. Posteriormente, se aplica líquido penetrante de color rojo, este líquido penetra en los defectos que se encuentran abiertos en la superficie. El siguiente paso es limpiar el líquido penetrante. Finalmente se aplica un líquido revelador, el cual se encarga de extraer el líquido penetrante que se encontraba en los defectos. De esta manera se identifica de una manera visual y clara los defectos que contiene la superficie donde se realizó el ensayo.

3.1.2 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Partículas magnéticas son otro tipo de ensayo no destructivo. Este método se utiliza para detectar defectos en la superficie del material o inmediatamente bajo de la superficie, en materiales ferromagnéticos [18]. Este método no es aplicable en aceros austeníticos.

Este ensayo funciona magnetizando la pieza, esto se puede realizar de manera directa o indirecta. Una vez la pieza se encuentra magnetizada, se aplican partículas que poseen alta permeabilidad magnética, es decir, son fácilmente magnetizables, lo que permite que las partículas se alineen rápidamente con el campo magnético y viajen en el sentido del miso. De esta manera, cuando se aplica un campo magnético y este pasa a través de un defecto en el material, se produce una fuga magnética -se rompe el campo- permitiendo que las partículas se aglomeren sobre el defecto, de esta manera se identifica la posición y el tamaño de la discontinuidad del material.

3.1.3 ULTRASONIDO

Es otra implementación de ensayos no destructivos. Se utiliza para detectar defectos internos en la superficie y para evaluar rápidamente el tipo, dimensión y posición dentro de la sección transversal [18]. El método se basa en la reflexión de ondas ultrasónicas, las cuales viajan a través del material, usando un transductor, hasta que llegan a un defecto del material o a la superficie posterior de este, cuando las ondas chocan con un defecto se refleja una parte de esta, lo que permite detectar la posición y el tamaño de la discontinuidad del material. El equipo registra los ecos reflejados y los muestra en una pantalla como señales.

3.2 ALIVIO TÉRMICO

El alivio térmico es un proceso diseñado para reducir las tensiones residuales inducidas durante procesos de fabricación o mecanizado, como la soldadura, la fundición o el conformado mecánico. Estas tensiones suelen formarse debido a gradientes térmicos, deformaciones plásticas o cambios microestructurales que ocurren durante el enfriamiento desigual de un material. El objetivo principal del alivio térmico es mejorar las propiedades mecánicas, aumentar la estabilidad dimensional y prolongar la vida útil de los componentes críticos, evitando fallos prematuros.

El alivio térmico consiste en calentar un material hasta una temperatura predeterminada, generalmente por debajo del punto de recristalización, seguido de un enfriamiento controlado. Durante el calentamiento, las tensiones internas se

redistribuyen y parcialmente se eliminan mediante procesos como el deslizamiento de dislocaciones y la relajación de la estructura cristalina [19]. A menudo se usa en materiales metálicos, como aceros al carbono, aleaciones de aluminio, y superaleaciones a base de níquel, dada su susceptibilidad a tensiones residuales.

3.3 BALANCEO DINÁMICO

El balanceo dinámico es utilizado para equilibrar sistemas rotativos, minimizando vibraciones y garantizando un funcionamiento estable durante operaciones a alta velocidad. Este método es crucial para prevenir daños estructurales en componentes críticos y extender su vida útil.

El balanceo dinámico se basa en la identificación y corrección de desequilibrios en un rotor o sistema rotativo. Un desequilibrio ocurre cuando la distribución de masa alrededor del eje de rotación no es uniforme, causando fuerzas centrífugas que inducen movimientos oscilatorios. Estas vibraciones pueden generar desgaste excesivo en componentes como cojinetes, reducir la eficiencia energética y aumentar el riesgo de falla [20].

Para corregir estos desequilibrios, se emplean sensores avanzados que detectan las vibraciones generadas por el sistema en operación. Una vez identificados los puntos de mayor intensidad vibratoria, se añaden o eliminan masas compensatorias en posiciones estratégicas del rotor.

3.4 ESPECIFICACIÓN CCH 70-4

Esta especificación es utilizada como un criterio de aceptación para aceros fundidos en máquinas hidráulicas. Se implementa en la industria hidroeléctrica para la liberación de componentes nuevos, por lo que es un buen punto de referencia para liberación de componentes reparados. El alcance de esta especificación se centra especialmente para ensayos no destructivos: tintas penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido y radiografía, explicando su aplicación y los criterios de aceptación catalogados en diferentes clases, siendo la clase 1 la más exigente y clase 5 la más flexible. Con el fin de clarificar la manera en la que la especificación CCH 70-4 presenta el criterio de aceptación de los END, se presenta a continuación

el criterio de aceptación en una clase aleatoria para tintas penetrantes y partículas magnéticas.

- Tintas penetrantes: En la Figura 3.7.1 se presenta un ejemplo del criterio de aceptación para tintas penetrantes clase 3. Como se presenta en la figura, los requerimientos para cumplir el criterio de aceptación clase 3 de la especificación CCH 70-4 en tintas penetrantes indica que las indicaciones relevantes tienen un sangrado de las tintas igual o mayor 1.5mm. Las indicaciones relevantes no pueden exceder el criterio de aceptación, que indica: para indicaciones redondeadas el diámetro del sangrado de las tintas penetrantes no puede exceder los 4mm, para indicaciones lineales la longitud del sangrado de las tintas penetrantes no puede exceder los 3mm y para indicaciones aglomeradas no pueden estar juntas en una longitud mayor a 4mm. Por último el criterio indica que la densidad de indicaciones relevantes no debe exceder el 4% del área total evaluada, en la Figura 3.7.1 se presenta un ejemplo, en el cual las indicaciones relevantes no deben exceder un área de 40mm², en el ejemplo las indicaciones relevantes abarcan un área de 40mm² y las indicaciones no relevantes 4mm², por lo que la imagen presenta un ejemplo en el que se cumple el criterio de aceptación clase 3.

CLASS 3

Acceptance criteria:

- 1) Smallest relevant isolated indication: $a = 1.5 \text{ mm}$
- 2) No "rounded" indication with $a > 4 \text{ mm}$
- 3) No "linear" indication ($a > 3 \text{ mm}$)
- 4) No "aligned" indications ($l > 4 \text{ mm}$)
- 5) Density 4.0 %. The total area of relevant indications may not exceed 40 mm^2 .

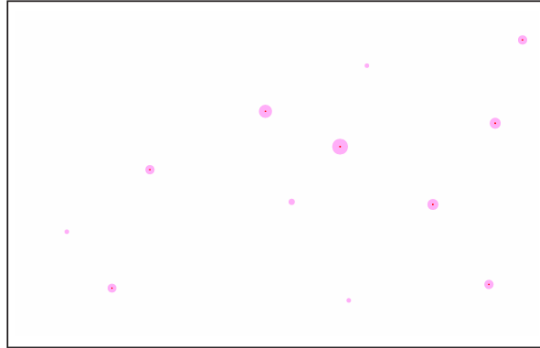


Figura 3.7.1. Criterio de aceptación clase 3 END-PT. [18].

- Partículas magnéticas: En la Figura 3.7.2 se presentan los criterios de aceptación para el ensayo no destructivo de partículas magnéticas. Como se presenta en la figura, los requerimientos para cumplir el criterio de aceptación clase 1 de la especificación CCH 70-4 en partículas magnéticas presenta que las indicaciones relevantes tienen una dimensión igual o mayor 0.5mm. Por otro lado, el criterio de aceptación en nivel 1 no acepta discontinuidades lineales, ni porosidades, ni cavidades superficiales.

Type of defect		Max. dimension of indication or No. of reference standard acc. to ASTM E 125				
	Quality levels	1 ⁽¹⁾	2	3	4	5
Smallest relevant indication (in mm)		0.5	1	1.5	2	3
Linear discontinuities		unacceptable				
- maximum length of indication		-	3 mm	5 mm	10 mm	15 mm
- maximum sum of indication lengths in $\Sigma_{(2)}$		-	18 mm	30 mm	60 mm	90 mm
- minimum edge-to-edge distance between two aligned indications ⁽³⁾		-	10 L	8 L	5 L	4 L
Porosity		unacceptable				
- maximum dimension of indication / Σ		-	3 mm	5 mm	5 mm	5 mm
- ratio: sum of indication surfaces / Σ		-	2 ‰	5 ‰	10 ‰	20 ‰
- minimum edge-to-edge distance between two adjacent indications		-	9 mm	15 mm	15 mm	15 mm
Surface cavities ⁽⁴⁾						
Inclusions ⁽⁴⁾		unacceptable	n° II-1	n° II-2	n° II-3	n° II-4
		unacceptable	n° III-1	n° III-2	n° III-2	n° III-3

Figura 2.7.2. Criterio de aceptación END-MT. [18].

3.5 RODETE FRANCIS

El rodete Francis es una de las partes fundamentales de las turbinas hidráulicas que son ampliamente utilizadas para la generación de energía. El rodete Francis está diseñado para operar en un rango amplio de caudales y alturas de carga, lo que permite adaptarse a diferentes condiciones operativas. El rodete está compuesto por álabes fijos curvos que optimizan el flujo del agua transformando la energía cinética del fluido en energía mecánica [21]. A continuación, se presenta una figura de un rodete con las zonas y partes que lo componen.

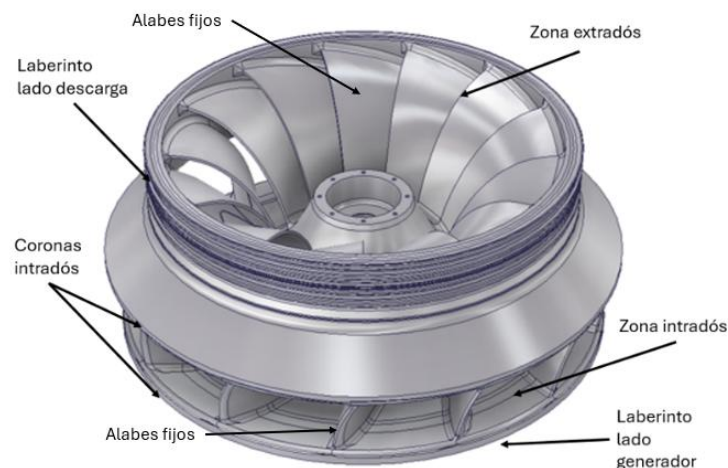


Figura 3.5.1. zonas y partes de rodete Francis.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un procedimiento para la rehabilitación de un rodete Francis perteneciente a una pequeña central hidroeléctrica de 15 MW, integrando especificaciones técnicas como la CCH70-4.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

4.2.1 Definir los requerimientos de inspección y reparación, mediante metrología, control de dureza y ensayos no destructivos (END), siguiendo las especificaciones de la CCH70-4.

4.2.2 Especificar un procedimiento de reconstrucción de acuerdo con los requerimientos especificados en el objetivo específico 1.

4.2.3 Implementar el procedimiento de reconstrucción en un rodete Francis, de una PCH de 15 MW.

4.2.4 Verificar el procedimiento propuesto, implementado en el rodete reconstruido, mediante inspecciones finales (END, metrología y mediciones de dureza), evaluándolo con los requisitos establecidos en las especificaciones de la CCH70-4.

5. METODOLOGIA

5.1. REQUERIMIENTOS

Esto constituye la fase inicial del procedimiento y permite establecer, con fundamento técnico verificable, el estado real del rodete Francis antes de cualquier intervención metalúrgica, en esta etapa se recolecta evidencia objetiva de condición superficial, integridad estructural y desviaciones geométricas del componente.

Por consiguiente, la información resultante, sirve como insumo base para decidir la estrategia de recuperación, los procesos metalúrgicos a aplicar, los consumibles adecuados y los criterios dimensionales de referencia para restaurar las geometrías originales del rodete de 15 MW. Con el fin de garantizar imparcialidad y trazabilidad

técnica en los resultados, los ensayos no destructivos se realizarán con una empresa externa especialista en END a máquinas rotativas hidráulicas.

5.1.1. INSPECCIÓN VISUAL

Este es el primer control de condición del componente y se realiza antes de la aplicación de cualquier técnica instrumental, pues su objetivo es identificar discontinuidades evidentes en la superficie del rodete, tales como zonas erosionadas por cavitación, picaduras, desbastes previos, fisuras visibles, desprendimientos de material, deformaciones plásticas y trazas de abrasión por partículas sólidas en el flujo.

Para garantizar que la evaluación se lleve a cabo sobre superficies limpias y libres de contaminantes que puedan ocultar defectos, el rodete es sometido previamente a una limpieza superficial conforme a las normas **SSPC-SP1** (limpieza con solventes) [17] y **SSPC-SP3** [18], (preparación mecánica mediante herramientas motorizadas), según sea necesario.

Una vez completada la limpieza, se procede a la inspección detallada del componente con iluminación directa y herramientas de inspección visual, dicho proceso es ejecutado por un inspector Nivel 2 calificado. Durante esta etapa se documentan visualmente las áreas afectadas mediante fotografías, mediciones preliminares y anotaciones en croquis de referencia, con el fin de mapear las zonas más comprometidas y analizar posibles patrones de desgaste.

La inspección visual no solo identifica daños evidentes, sino que también proporciona contexto operacional: permite correlacionar áreas erosionadas con condiciones potenciales de operación (por ejemplo, zonas de recirculación local del flujo o zonas donde se producen fenómenos cavitantes), lo cual resulta útil para interpretar posteriormente los ensayos no destructivos que se aplicarán. La información obtenida se consolida en un informe formal y se convierte en una línea base de comparación frente a los resultados de las demás técnicas de evaluación, constituyéndose así en un insumo imprescindible para la definición del alcance metalúrgico de la reparación y un estimativo del alcance dimensional.

En la Figura 5.1.1 se presentan las partes del rodete.

La inspección debe iniciar con una marcación de los álabes fijos del rodete en la zona de entrada del agua (intradós) y en la zona de salida (extradós), partiendo desde un punto de referencia como la marcación del rodete e incrementando la numeración en el sentido de giro del rodete. Con la numeración realizada se debe inspeccionar cada uno de los álabes, prestando especial atención a las raíces de los mismos, luego, la inspección debe realizarse en los laberintos y coronas del rodete y finalmente en la zona de encastre.

5.1.2. END DE RECEPCIÓN

Una vez completada la inspección visual inicial, se procede a la inspección con técnicas de ensayos no destructivos (END) con el propósito de detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales que no son perceptibles a simple vista.

Puede decirse que es la etapa más crítica para definir el alcance real del daño estructural y la profundidad de las afectaciones sobre el material base, lo que posteriormente condiciona la selección de procedimientos de soldadura, control térmico y profundidad de maquinado a ser aplicados, por eso, para garantizar imparcialidad técnica en la evaluación, las pruebas END son realizadas por una empresa externa especializada en inspección de componentes rotativos hidráulicos, independiente del equipo ejecutor del proyecto, lo que permite asegurar que los resultados no se vean influenciados por el interés de ninguna de las partes involucradas en la reparación.

En esta fase se aplican tres métodos END principales: tintas penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido; las tintas penetrantes permiten detectar grietas abiertas a superficie, porosidades, fisuras superficiales y discontinuidades causadas por cavitación; el método de partículas magnéticas es empleado para detectar discontinuidades ubicadas en la zona superficial y en la subsuperficie inmediata, siempre que la aleación presente características ferromagnéticas adecuadas, y por último, el ultrasonido permite identificar discontinuidades internas, cambio de espesores, pérdida de sección y variación de reflectividad asociada a defectos no

accesibles por vía superficial, por ende, la combinación de estos métodos END proporciona una caracterización robusta y complementaria del estado metalúrgico del rodete, permitiendo establecer la localización exacta, severidad y extensión de los defectos que deben ser intervenidos.

Todos los ensayos deben realizarse en el 100% de los álabes fijos con especial énfasis en las raíces, adicionalmente deben realizarse mínimamente en los laberintos y coronas del rodete, ya que estas son las zonas de mayor desgaste y esfuerzo mecánico.

Los resultados obtenidos se consignan en informes técnicos emitidos por la empresa ejecutora de los END, los cuales incluyen ubicación de indicaciones, clasificación según tipo de discontinuidad, nivel de severidad y nivel de aceptación o rechazo conforme a estándares aplicables, de esta forma los informes constituyen evidencia documental del estado inicial del componente y se convierten en un insumo indispensable para la trazabilidad de la reparación, asegurando que el proceso de rehabilitación parta de información verificable y técnicamente sustentada.

5.1.3. MUESTREO DE DUREZAS

Posteriormente a la aplicación de los ensayos no destructivos iniciales, se realiza un muestreo de durezas sobre el rodete con el fin de evaluar la condición metalúrgica del material base y determinar posibles variaciones mecánicas inducidas por degradación operacional, reparaciones previas o efectos térmicos acumulados.

El muestreo se ejecuta mediante el uso de un durómetro digital portátil, calibrado y certificado, el cual permite obtener valores de dureza en puntos estratégicos del rodete, previamente establecidos según planos de referencia y criterios de ingeniería.

En esta etapa, la selección de puntos de medición se realiza considerando zonas sometidas a mayor impacto hidráulico, tales como los bordes de ataque y salida de los álabes, las superficies de succión donde se concentran fenómenos de cavitación, las zonas donde se evidencian desgastes severos por abrasión y aquellas donde los END hayan detectado indicaciones relevantes.

Además, se incluyen puntos de control en zonas no afectadas, con el propósito de establecer un patrón de referencia metalúrgico que permita comparar entre áreas dañadas y áreas en buen estado, misma comparación que es útil para identificar degradaciones mecánicas diferenciales y para establecer si la dureza presente aún se encuentra dentro de rangos aceptables para su aleación original o si ha sufrido endurecimiento o ablandamiento por efectos térmicos o mecánicos.

Los valores de dureza obtenidos sirven no solo para evaluar la condición actual del material, sino también para determinar la viabilidad del proceso de soldadura a aplicar, puesto que, valores excesivamente altos pueden indicar endurecimiento y presencia de microestructuras fragilizadas, lo cual incrementaría la susceptibilidad al agrietamiento bajo aporte térmico [22], por el contrario, valores significativamente bajos pueden evidenciar pérdida de propiedades mecánicas y deterioro microestructural, con afectación directa a la resistencia del componente [23]. Los resultados se consolidan en un informe técnico estructurado, donde se documentan los valores de dureza, la localización de cada punto de medición y la interpretación preliminar de los resultados. Cabe aclarar que el método con durómetro portátil de rebote no genera identaciones significativas en el material, sin embargo, las identaciones serán tapadas con soldadura o eliminadas por medio de pulido en pasos futuros.

5.1.4. METROLOGÍA CONVENCIONAL DE RECEPCIÓN

Constituye la etapa final del levantamiento diagnóstico inicial y tiene como objetivo cuantificar las desviaciones dimensionales del rodete respecto a su geometría nominal original, para ello, se utilizan instrumentos calibrados y certificados tales como calibradores de hasta 2 metros de longitud, micrómetros internos y externos, siguiendo los puntos definidos en el plano técnico del componente.

La selección de los puntos de medición no es arbitraria; estos se determinan en función de los planos del diseño del rodete y considerando las zonas donde se ha identificado mayor desgaste en fases previas. Entre estas zonas se incluyen las superficies de descarga, las caras internas de los álabes, los bordes de ataque, los bordes de salida y las uniones entre corona y álabe, y se busca obtener no solo valores lineales individuales, sino relaciones dimensionales entre puntos

estratégicos que permitan evaluar simetría, uniformidad y balance geométrico del impulsor.

Esta fase es fundamental para dos decisiones críticas en la reparación: (1) la restauración dimensional, y (2) el cálculo de material de aporte requerido en soldadura, de ahí que, los resultados de la metrología permiten establecer la magnitud del exceso de desgaste, determinar la profundidad de recuperación requerida por soldadura, y evaluar si las geometrías alteradas pueden recuperarse mediante aporte metálico controlado o si será necesario retirar más material antes de reconstruir.

Por otro lado, el proceso también establece la línea base que se utilizará para comparar el estado inicial del rodete con su estado final tras la intervención, por tanto, este levantamiento dimensional garantiza que la restauración posterior no solo responda a criterios visuales o metalúrgicos, sino que restituya la geometría funcional necesaria para reestablecer el comportamiento hidráulico del rodete, esta geometría debe solicitarse al cliente o se debe tener mínimamente el escaneo del componente nuevo, en caso de no tenerla, el procedimiento solo se podrá hacer en rodetes con bajos niveles de desgaste.

Para poder determinar la línea base que se utilizará para comparar el estado inicial y final del rodete, es necesario tener un plano de mecanizado del rodete con tolerancias dimensionales y geométricas.

5.2. PROCEDIMIENTO

Con los resultados obtenidos en la etapa de diagnóstico inicial —inspección visual, ensayos no destructivos, mediciones de dureza y metrología— es posible definir el alcance real de la reparación del rodete y, a partir de ello, especificar el proceso que permita su recuperación dimensional y estructural. Mediante este paso, se establece la estrategia técnica de intervención y determina el conjunto de operaciones metalúrgicas y mecánicas necesarias para restituir la geometría funcional del impulsor Francis de 15 MW.

En esta definición se consideran tanto las limitaciones derivadas del estado actual del componente como las capacidades tecnológicas disponibles, buscando un

equilibrio que asegure la factibilidad operativa y la recuperación eficiente del impulsor.

Para este punto, se formaliza la metodología con base en los resultados del diagnóstico: se identifican las zonas críticas a intervenir, se cuantifica la magnitud del desgaste y se seleccionan los métodos que permitan reconstruir la geometría original, especialmente en zonas complejas como son los álabes, y para ello se hace necesario jerarquizar los defectos encontrados y establecer prioridades dentro del proceso de intervención, lo que permite que, las decisiones tomadas en esta fase se documentan en una hoja técnica de reparación, la cual se convierte en referencia obligatoria para el personal de ejecución del proceso.

5.2.1. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DETECTADOS POR MEDIO DE LAS INSPECCIONES REALIZADAS ANTERIORMENTE

Una vez consolidados los resultados de las inspecciones, se procede a la identificación de los puntos críticos del rodete que requieren intervención, por tanto, dicha identificación se basa en el cruce de datos provenientes de la inspección visual, de los END, de las mediciones de dureza y de la metrología; de esta correlación surge un mapa técnico llamado mapeo de defectos (ejemplo en página 61) que permite ubicar de manera precisa los defectos más significativos, su extensión, su posible origen y su repercusión sobre la integridad estructural y el desempeño hidráulico.

Aquí se clasifica cada tipo de discontinuidad detectada, por ejemplo, las discontinuidades superficiales por cavitación se presentan comúnmente como picaduras o erosiones puntuales en las superficies de succión o borde de fuga de los álabes; mientras que las discontinuidades internas detectadas por ultrasonido pueden evidenciar pérdida de espesor o zonas con micro fisuración subsuperficial, entonces, la discriminación entre uno u otro tipo de discontinuidad permite definir los distintos niveles de intervención que deberán ser aplicados en cada área del impulsor.

Adicionalmente, la identificación de puntos críticos permite determinar la secuencia lógica de la reconstrucción: no todas las zonas del rodete requieren el mismo

tratamiento ni la misma profundidad de reparación, tanto así que la priorización de zonas críticas garantiza que los recursos de tiempo, aporte metálico y mecanizado se empleen de manera eficiente, concentrándose en los sectores cuya reparación genere mayor impacto en el restablecimiento del desempeño hidráulico del rodete. El resultado de este subproceso es un mapeo de defectos en el que el rodete se divide en zonas de intervención, cada una de ellas asociada a una estrategia particular de reparación, con lo cual se establece una base sólida para la etapa de reconstrucción dimensional.

5.2.2. CUANTIFICACIÓN DEL DESGASTE EN EL RODETE

Una vez identificadas las zonas críticas, se determina cuantitativamente el nivel de desgaste mediante la comparación de las mediciones obtenidas en la metrología de recepción con los valores dimensionales nominales consignados en los planos del componente, misma cuantificación que permite definir con precisión la magnitud de material perdido y, en consecuencia, la cantidad de aporte metálico y mecanizado que será necesario para recuperar la geometría original del rodete.

Para este análisis se toman en consideración distintas superficies y elementos geométricos del impulsor, tales como el borde de ataque, el borde de salida, las superficies de succión y de presión de los álabes, así como la corona y la banda; la comparación dimensional se realiza mediante la superposición de valores medidos sobre el plano de diseño, de forma que se identifiquen zonas donde se presentan desviaciones superiores a los límites aceptables (tolerancias dimensionales de plano), y por consiguiente, es la comparación la que permite clasificar el desgaste como aceptable o rechazado, lo cual es fundamental para orientar la estrategia de reparación.

En los casos donde el desgaste se encuentra dentro de rangos aceptables, el componente puede ser intervenido mediante procesos de suavizado o corrección superficial mínima; sin embargo, cuando el desgaste es severo, surge la necesidad de realizar aportes metálicos por soldadura para restituir el volumen perdido. Adicionalmente, en esta fase se evalúa la necesidad de retirar material previo al aporte, en el caso de que existan defectos profundos que requieran saneamiento

previo mediante desbaste controlado, al finalizar el saneamiento, debe verificarse por medio de tintas penetrantes la eliminación de la discontinuidad.

Este análisis dimensional representa un insumo crítico para la toma de decisiones, ya que define el alcance de la intervención metalúrgica y el volumen aproximado de material que deberá ser reconstituido, permitiendo planificar de manera eficiente las operaciones de soldadura y mecanizado.

5.2.3. DEFINIR MÉTODO PARA RECONSTRUIR GEOMETRÍAS COMPLEJAS

En los rodets Francis, los álabes constituyen las superficies más críticas desde el punto de vista geométrico, debido a que su curvatura tridimensional y su perfil hidrodinámico determinan el comportamiento del flujo interno y, por lo tanto, el rendimiento hidráulico del impulsor, por tanto, la reconstrucción de estas superficies exige un método que permita replicar fielmente dichas geometrías, evitando desviaciones que puedan alterar el patrón de circulación del fluido e introducir pérdidas adicionales de energía.

Para tal fin, se emplea el método de referencia basado en el uso del álabe que presente menor nivel de desgaste como patrón de replicación, este álabe es medido dimensionalmente con alta precisión y, a partir de su perfil, se fabrican plantillas metálicas que reproducen su geometría transversal en distintos cortes estratégicos. Dichas plantillas actúan como guías físicas para orientar tanto el aporte metálico por soldadura como el posterior mecanizado y pulido, permitiendo controlar que la reconstrucción mantenga la continuidad geométrica necesaria para asegurar el desempeño hidráulico original.

El empleo de plantillas ofrece ventajas sobre otros métodos debido a su simplicidad operativa, repetibilidad y bajo costo; adicionalmente, permite realizar verificaciones inmediatas durante la reconstrucción, comparando la geometría obtenida con el perfil objetivo definido por el álabe de referencia, por lo cual es válido afirmar que el método contribuye a garantizar la uniformidad entre álabes, lo cual es esencial para evitar desequilibrios mecánicos y mantener la simetría del rodete.

5.3.APLICACIÓN

La implementación del proceso de reparación corresponde a la etapa donde las decisiones técnicas previamente establecidas se traducen en intervenciones físicas sobre el rodete; en esta fase, cada una de las acciones definidas se ejecuta de manera secuencial y controlada, garantizando trazabilidad, coherencia técnica, repetibilidad operativa y cumplimiento de los requerimientos establecidos por normas aplicables del sector, de esta manera, el orden lógico de ejecución se basa en el principio de reparar primero la condición metalúrgica y estructural, posteriormente restituir volumen y geometría mediante aportes metálicos, y por último garantizar precisión final mediante mecanizado y verificación dimensional.

Dado que el rodete objeto de estudio corresponde a una turbina Francis de 15 MW, se asume que el componente presenta un nivel de exigencia mecánica y dinámica considerable, debido a sus altas velocidades operativas y al impacto hidráulico permanente al que está sometido durante la conversión energética, por esta razón, cada una de las actividades de reparación debe ejecutarse bajo criterios estrictos de control de calidad y considerando la integridad estructural como eje central de las decisiones tomadas.

En esta fase el proceso central de aporte metálico seleccionado es el proceso de soldadura **SMAW** (Shielded Metal Arc Welding) y **GMAW** (Gas Metal Arc Welding), un proceso se adopta como eje principal debido a su alta aplicabilidad industrial, flexibilidad operativa, facilidad de control en campo, dominio técnico en el contexto nacional y capacidad de realizar aportes volumétricos suficientes en zonas afectadas por desgaste severo, sin embargo, según la condición del material base o del espesor local, pueden emplearse de forma complementaria procesos GTAW como etapa auxiliar de refinamiento o reconstrucción final, sin desplazar a SMAW y GMAW como método de referencia para el aporte primario. Para realizar el procedimiento de aplicación de soldadura, se debe contar con la calificación del procedimiento de soldadura (WPS), con la calificación del soldador (WPQ) y el registro de calificación del procedimiento (PQR).

De manera general, la implementación incluye las actividades de eliminación de discontinuidades, aporte metálico mediante soldadura, reconstrucción de

geometrías complejas, mecanizado de precisión, pulido final y balanceo dinámico del rodete, y la correcta coordinación de estas actividades permite asegurar que el componente alcance las condiciones estructurales y geométricas originales, restituyendo así su desempeño hidráulico y su capacidad de operación segura dentro de la PCH.

Los procedimientos que no puedan realizarse y deban ser subcontratados, deberán solicitarse soportes de la aplicación y se realizarán interventorías para garantizar que se realicen correctamente. Los soportes de la aplicación deben ser informes en los que se especifique el procedimiento, los consumibles y los equipos utilizados, con su respectivo soporte de calibración.

5.3.1. ELIMINACIÓN DE DISCONTINUIDADES

El primer paso de intervención física sobre el componente consiste en eliminar y sanear las discontinuidades detectadas durante la inspección inicial, así estas discontinuidades pueden ser: grietas superficiales, microfisuras, zonas erosionadas por cavitación, o cavidades residuales generadas por impactos hidráulicos; de ahí que su eliminación previa es indispensable antes de cualquier aporte metálico, debido a que la soldadura aplicada sobre material defectuoso puede generar propagación de grietas, atrapamiento de discontinuidades o falta de fusión interna, comprometiendo la integridad final del rodete.

El saneamiento se realiza mediante eliminación mecánica controlada, utilizando herramientas rotativas y abrasivas, este procedimiento se lleva a cabo siguiendo la directriz de la norma **SSPC-SP3** [18], la cual establece que la preparación de superficie mediante herramientas mecánicas debe permitir la remoción de material superficial deteriorado, pinturas antiguas, incrustaciones y pequeños defectos, exponiendo material sano y limpio que permita la correcta adherencia del futuro aporte metálico, por eso, la preparación mecánica se efectúa empleando fresas metálicas, discos abrasivos y pulidoras portátiles, controlando la profundidad de remoción para evitar sobrecortes que alteren la geometría original.

La eliminación de discontinuidades no se limita únicamente a la remoción del material externo visiblemente deteriorado; también implica profundizar o recrecer la

discontinuidad hasta exponer metal sano con continuidad estructural, de esta manera se garantiza que el volumen destinado a ser reconstruido por soldadura quede libre de inclusiones, microfisuras o zonas debilitadas, y es así como el control del saneamiento debe verificarse nuevamente mediante ensayos líquidos penetrantes, realizados exclusivamente sobre las zonas saneadas.

Con ello se comprueba que las discontinuidades detectadas inicialmente han sido completamente removidas y que la superficie está apta para recibir el proceso de soldadura. En síntesis, la etapa se documenta mediante registro fotográfico y croquis de cada área saneada, y el registro se convierte en evidencia técnica obligatoria del estado de preparación del rodete y permite conservar trazabilidad de la magnitud real de intervención ejecutada.

5.3.2. APLICACIÓN DE SOLDADURA

Una vez saneadas las discontinuidades, se procede a la fase de reconstrucción volumétrica mediante soldadura, es en este paso que el proceso seleccionado como método central de aporte metálico es el proceso de soldadura con arco por electrodo revestido y soldadura por arco con gas y metal (**SMAW** y **GMAW** por sus siglas en inglés, respectivamente).

La elección de SMAW como proceso principal se fundamenta en su alta aplicabilidad industrial en el contexto nacional, su versatilidad para aportar material en zonas complejas y su disponibilidad operativa en talleres metalmecánicos de reparación asociados al sector hidroenergético, y adicionalmente, SMAW permite controlar progresivamente la cantidad de material aportado, lo cual es esencial cuando se pretende reconstruir superficies complejas en álabes y cuerpos curvos del impulsor. La elección de GMAW también como proceso principal se fundamenta en su versatilidad para realizar procesos semiautomáticos, los cuales permiten la aplicación del material de aporte de manera más homogénea y con mejor eficiencia en tiempos de aplicación, adicionalmente este proceso también permite controlar progresivamente la cantidad de material aportado.

Antes de iniciar el proceso de soldadura, se selecciona el material de aporte más adecuado para garantizar compatibilidad metalúrgica con el acero base del rodete,

para ello se consideran aleaciones de electrodos diseñados para aceros inoxidables martensíticos o aceros inoxidables austeníticos, dependiendo de las especificaciones de material base del impulsor. Para conocer las especificaciones del material base, debe realizarse una espectrometría óptica del material y por medio de la composición química, determinar el tipo material base, de esta forma se podrá elegir el material de aporte equivalente por soldadura.

Al seleccionar el material base, deben realizarse en caso de no tenerlos el WPS, PQR y WPQ.

La selección correcta del consumible permite minimizar el riesgo de aparición de zonas endurecidas o frágiles y asegurar una buena resistencia al desgaste hidráulico posterior; en paralelo, se controla la temperatura interpaso (especificada en el WPS) para evitar acumulación térmica excesiva, lo cual podría provocar tensiones residuales o deformación no deseada de las geometrías reconstruidas.

Durante el proceso, cada cordón de soldadura es depositado siguiendo una secuencia programada, la aplicación de aporte metálico se realiza por capas sucesivas, con un control de penetración y tamaño de cordón adecuados. Ello permite recuperar gradualmente el volumen perdido sin generar zonas de sobreespesor excesivo.

Al finalizar cada etapa de aporte, se ejecuta una inspección visual intermedia para controlar calidad superficial y verificar la correcta fusión del material aportado sobre el metal base previamente saneado, en ese sentido, esta rutina de inspección continua permite detectar y corregir posibles defectos de soldadura en el mismo momento de su generación, evitando acumulación de defectos que posteriormente sean difíciles de eliminar.

Una vez se completa el aporte metálico en toda la extensión definida, se procede a aplicar un tratamiento térmico de alivio de tensiones (post weld heat treatment – PWHT), con el fin de reducir las tensiones residuales generadas durante las operaciones de soldadura, por añadidura, el alivio térmico se realiza en horno controlado, estableciendo un ciclo térmico específico, acorde con el tipo de acero base y material de aporte seleccionado, es decir, este tratamiento contribuye a

mejorar la estabilidad estructural de las zonas reparadas, reduciendo el riesgo de agrietamiento o falla prematura durante la operación del rodete.

La totalidad de esta etapa queda documentada mediante los procedimientos WPS, PQR y las calificaciones de soldador WPQ correspondientes, los cuales certifican que la reparación fue ejecutada siguiendo parámetros técnicamente validados.

5.3.3. FABRICACIÓN DE PLANTILLAS

En el caso de los rodets Francis, la zona más crítica para la recuperación geométrica corresponde a los álabes, ya que su perfil tridimensional define las condiciones de paso, aceleración y distribución del flujo hidráulico, además, estos elementos son los que presentan mayor sensibilidad ante desviaciones geométricas, pues pequeñas variaciones pueden inducir turbulencia, pérdidas energéticas y disminución del rendimiento hidráulico.

Debido a ello, la reconstrucción de los álabes no se puede ejecutar “a ojo” ni mediante aproximaciones cualitativas: se requiere un método físico de control dimensional constante, y para este fin, se fabrican plantillas metálicas basadas en el álabe que presente el menor nivel de desgaste, el cual se toma como referencia geométrica.

El álabe se mide dimensionalmente en diferentes secciones transversales estratégicamente seleccionadas, partiendo de dichas mediciones se trazan, cortan y conforman plantillas metálicas elaboradas con lámina, ángulo estructural y barras de acero al carbono 1020, por añadidura, estas plantillas permiten definir el perímetro que debe recuperar cada sección del álabe intervenido.

Durante la reconstrucción volumétrica mediante aportes metálicos, estas plantillas se emplean como guías físicas, entonces cada plantilla se posiciona en el punto correspondiente del álabe en reparación y se realiza un ajuste comparativo directo entre la geometría existente y el perfil objetivo representado por la plantilla. Si la geometría reconstruida aún no coincide con la plantilla, se procede a ajustar la cantidad de aporte, la posición del cordón o la profundidad de desbaste posterior.

En efecto el método garantiza uniformidad entre álabes, mantiene la simetría del rodete y permite controlar progresivamente la recuperación de la geometría hidrodinámica, y sin ir más lejos, posibilita que el control dimensional se realice de

manera inmediata y constante, facilitando la validación final del componente antes de las etapas de mecanizado y pulido de precisión.

5.3.4. MECANIZADO FINAL

Una vez concluida la etapa de aporte metálico y verificación dimensional preliminar mediante plantillas, se procede al mecanizado final del rodete, en concreto dicha etapa tiene como objetivo dotar a las superficies reconstruidas de la precisión geométrica y dimensional necesaria para restituir los radios, curvaturas, espesores y transiciones que caracterizan el perfil hidráulico funcional del impulsor; ahora bien, el mecanizado final es una fase crítica, pues en ella se garantiza que el volumen reconstruido se ajuste a la geometría nominal requerida para asegurar un comportamiento hidráulico estable y eficiente durante la operación en la PCH.

El mecanizado se lleva a cabo mediante máquinas herramientas de control numérico computarizado (CNC) o, en su defecto, tornos verticales de alta capacidad, dependiendo del tamaño del componente y de la configuración de taller disponible, aun así la selección del tipo de máquina está condicionada por el diámetro del rodete, la geometría de acceso a las superficies internas y la complejidad del perfil de los álabes; en muchos casos, el mecanizado de los bordes y superficies principales del rodete puede realizarse en torno vertical, mientras que el acabado de zonas complejas y perfiles internos requiere el uso de centros de mecanizado CNC con cabezales de múltiples ejes, o en caso de no contar con esta tecnología, puede brindarse la geometría final de los álabes por medio de pulido utilizando las plantillas previamente fabricadas.

Durante esta etapa, se aplican secuencias programadas de desbaste y acabado para eliminar el exceso de aporte metálico y aproximar las superficies reconstruidas a su geometría final; el desbaste inicial se ejecuta con herramientas de corte de mayor capacidad para remover la mayor parte de material sobrante, y posteriormente, se realizan pasadas de acabado, logrando así contornos suavizados y tolerancias dimensionales estrechas; las plantillas fabricadas previamente continúan utilizándose como elemento de control y verificación, comparando el perfil mecanizado contra la geometría objetivo definida, en caso de tener las herramientas CNC para dicho mecanizado en zonas complejas.

El mecanizado final también cumple una función adicional: restituir superficies funcionales que servirán como referencia para el balanceo dinámico posterior. Al garantizar que las superficies activas del rodete mantengan simetría y uniformidad, se reduce significativamente el riesgo de desbalance inherente y se incrementa la probabilidad de que el balanceo dinámico final exija correcciones mínimas, y de cualquier manera, se facilita tanto la etapa de pulido posterior como el desempeño dinámico del impulsor en operación.

5.3.5. PULIDO DE GEOMETRÍAS COMPLEJAS

Posterior al mecanizado final, se ejecuta el proceso de pulido de superficies críticas, principalmente en los álabes, con el objetivo brindar la geometría deseada utilizando las plantillas, en caso de no contar con tecnología CNC de múltiples ejes, y de eliminar irregularidades, marcas de corte y transiciones abruptas que puedan afectar el comportamiento hidráulico del flujo; el pulido constituye una etapa final de refinamiento superficial que contribuye a optimizar la eficiencia hidráulica, ya que superficies rugosas elevan las pérdidas por fricción, inducen turbulencias no deseadas y alteran la adherencia del flujo sobre los perfiles hidrodinámicos.

Para realizar el pulido se emplean herramientas rotativas tales como rotoesferas, piedras abrasivas y discos de desbaste de grano progresivo, permitiendo ajustar la textura superficial mediante secuencias controladas. Al fin y al cabo, el control de esta etapa no se efectúa únicamente mediante percepción visual o táctil del operador; se continúa usando las plantillas fabricadas previamente como referencia geométrica, asegurando que las superficies pulidas mantengan la congruencia dimensional y de perfil con el álabe patrón seleccionado.

El pulido es particularmente relevante en bordes de ataque y superficies de succión, donde pequeñas variaciones en rugosidad pueden generar alteraciones significativas en la dinámica interna del flujo, asimismo, esta etapa contribuye a disminuir la probabilidad de formación de puntos de cavitación incipiente, debido a que superficies más suaves dificultan la generación de micro turbulencias locales que sirven como núcleos de vaporización.

En síntesis, el pulido no solo cumple una función estética, sino que es parte integral del desempeño final del rodete, ya que impacta de manera directa en el rendimiento hidráulico y en la estabilidad dinámica del impulsor durante la operación.

5.3.6. BALANCEO DINÁMICO

Como fase final de la implementación, se procede al balanceo dinámico del rodete, etapa indispensable debido a que el componente opera a altas velocidades y está acoplado directamente al eje del generador; cualquier desbalance residual puede generar vibraciones, fatiga mecánica, pérdida de eficiencia y fallas prematuras, en pocas palabras el balanceo dinámico garantiza que el rodete opere dentro de tolerancias aceptables de desbalance, reduciendo la probabilidad de daños en operación.

El balanceo dinámico se realiza mediante la contratación de una empresa especializada que disponga de equipos de medición calibrados, máquinas de balanceo capaces de operar con el tamaño y masa del rodete, y personal técnico certificado para interpretar y aplicar las correcciones necesarias, decisión que asegura imparcialidad y calidad técnica en los resultados.

Durante esta etapa, el rodete se monta en una máquina de balanceo y se somete a ciclos de prueba con monitoreo de vibraciones y respuesta dinámica, en suma, de acuerdo a los resultados obtenidos, se adiciona o se remueve material de manera controlada, principalmente mediante micro desbastes o pequeñas adiciones, hasta lograr valores de desbalance que se encuentren dentro de las tolerancias establecidas para este tipo de equipos.

El balanceo dinámico no solo valida la geometría final obtenida durante las etapas de reconstrucción y mecanizado, sino que constituye un puente indispensable entre la reparación y la operación en campo, en definitiva, un rodete correctamente balanceado reduce significativamente el desgaste de cojinetes, minimiza las fuerzas dinámicas en el eje y garantiza un funcionamiento más estable y confiable, prolongando la vida útil del conjunto turbina-generador en la PCH.

5.4. COMPROBACIÓN

Una vez culminadas todas las actividades de reparación, reconstrucción geométrica, mecanizado, pulido y balanceo dinámico, se ejecuta la fase de evaluación final del rodete: cuya etapa tiene como objetivo verificar que el componente rehabilitado cumple con los criterios técnicos, metalúrgicos y dimensionales exigidos por la **especificación CCH70-4**, la cual establece parámetros de aceptación y metodologías de revisión para componentes hidráulicos sometidos a reconstrucción.

En esta fase aplican nuevamente técnicas de inspección visual, ensayos no destructivos, mediciones de dureza y metrología, las cuales permiten determinar si la reparación fue eficaz, si los defectos fueron eliminados y si las condiciones finales del rodete se encuentran dentro de las tolerancias aceptables para ser reintroducido en operación dentro de una PCH.

Esta verificación constituye la última barrera técnica antes de la entrega del componente a operación, pues la comparación entre el estado inicial y el estado final no solo valida la integridad de la reparación, sino que evidencia el cumplimiento de los objetivos planteados: recuperación estructural, restitución geométrica y cumplimiento de estándares técnicos aplicables al sector hidroenergético.

5.4.1. INSPECCIÓN VISUAL FINAL

La inspección visual final constituye el primer control de aceptación posterior a la reparación completa del rodete, la valoración se realiza nuevamente sobre superficies limpias, siguiendo el procedimiento de preparación superficial establecido en la norma **SSPC-SP1** [17], garantizando que no existan contaminantes que oculten imperfecciones; la inspección es ejecutada por un inspector Nivel 2 calificado, independientemente de los ejecutores de la reparación, de manera que exista objetividad técnica en la verificación.

En esta etapa se examina detalladamente toda la superficie del rodete, verificando específicamente:

- ausencia de discontinuidades visibles.

- uniformidad superficial en álabes y banda.
- continuidad geométrica en bordes de ataque y salida.
- acabado consistente en zonas soldadas y mecanizadas.
- ausencia de señales de sobrecalentamiento o decoloraciones anómalas

La inspección visual final también permite identificar cualquier indicio de defectos secundarios, tales como tensiones superficiales evidentes, pequeñas imperfecciones remanentes o irregularidades de superficie que no sean compatibles con el comportamiento hidráulico adecuado del componente, y si llegase a detectarse alguna desviación menor, esta puede ser corregida mediante intervención localizada, previo a la ejecución de los siguientes ensayos de aceptación final.

La información resultante se registra en un informe técnico final de inspección visual, el cual servirá de soporte documental para la aceptación o rechazo del componente. Solo en caso de cumplimiento satisfactorio se procede a la ejecución de los ensayos no destructivos finales, conforme a los criterios de aceptación definidos por la especificación CCH70-4.

5.4.2. END FINALES

Posteriormente a la inspección visual final, se ejecutan nuevamente los ensayos no destructivos (END) con el fin de verificar la integridad de las zonas intervenidas y confirmar que las discontinuidades presentes en el estado inicial fueron completamente eliminadas, y constituye la evidencia técnica más contundente en cuanto a la calidad de la reparación, ya que proporciona información objetiva y verificable sobre la condición metalúrgica del rodete después de la intervención.

Los END aplicados corresponden a los mismos métodos utilizados en la recepción: tintas penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido, y la aplicación de los mismos métodos garantizan comparabilidad directa entre el estado inicial y final, permitiendo determinar si:

- (i) las discontinuidades fueron eliminadas; (ii) no se generaron nuevas discontinuidades durante la reparación; (iii) no existe propagación de fisuras; (iv) no existen defectos asociados a sobrecalentamiento o a mala fusión del aporte metálico

Los END finales son realizados por una empresa externa especializada, con el mismo criterio de imparcialidad establecido en la etapa de diagnóstico, la independencia garantiza que los resultados emitidos no se vean influenciados por el interés de ninguna de las partes involucradas en la reparación, además, los criterios de aceptación aplicados durante esta etapa se basan en los parámetros establecidos por la **especificación CCH70-4**, la cual define límites de aceptación para diferentes tipos de defectos, amplitudes, longitudes, zonas afectadas y profundidades máximas admisibles.

Los informes técnicos emitidos en esta etapa incorporan registros visuales, resultados numéricos y mapas de indicaciones, donde se establece la condición final del rodete, clasificando cada resultado como aceptable o no conforme, según lo definido por la especificación. En esta instancia, cualquier indicación relevante que supere los límites establecidos por la CCH70-4 requerirá corrección inmediata antes de que el componente pueda ser liberado para operación. Para tintas penetrantes, el rodete debe cumplir mínimamente con el criterio de aceptación clase 2, para partículas magnéticas debe cumplir mínimamente con criterio de aceptación nivel 2 y para ultrasonido debe cumplir mínimamente con el criterio de aceptación nivel 2.

El cumplimiento satisfactorio de estos END finales es condición indispensable para pasar a las etapas siguientes de muestreo de durezas y metrología comparativa, y constituye el punto de cierre técnico de la validación metalúrgica del componente reconstruido.

5.4.3. MUESTREO DE DUREZAS FINAL

Tras la verificación metalúrgica mediante END finales, se realiza nuevamente un muestreo de durezas sobre el rodete con el fin de comparar los valores obtenidos en esta etapa con los valores iniciales registrados durante la recepción, mediante la comparación se hace posible determinar si el proceso de soldadura, el aporte metálico y las operaciones de mecanizado y pulido han alterado de manera

significativa la dureza del material base o del material aportado durante la reparación.

El muestreo se lleva a cabo utilizando un durómetro digital portátil, calibrado y certificado, aplicando el mismo procedimiento y los mismos puntos de medición considerados en la fase inicial, con el objetivo de mantener consistencia metrológica y permitir una comparación directa de resultados, mediante la consistencia metodológica asegura que cualquier variación detectada en los valores de dureza sea atribuible al proceso de reparación y no a diferencias en la metodología de medición.

La obtención de valores de dureza dentro de rangos aceptables constituye un indicador de que la reparación ha sido efectuada de manera adecuada, por otro lado, si se presentan valores excesivamente elevados podrían indicar la presencia de zonas endurecidas o afectadas térmicamente, lo que puede traducirse en fragilidad y susceptibilidad a la formación de grietas durante la operación; por el contrario, valores demasiado bajos pueden evidenciar que el material ha perdido propiedades mecánicas o ha sido afectado por procesos térmicos o mecánicos asociados a la interpolación de material.

Los resultados se consignan en un informe técnico que documenta los valores de dureza y las interpretaciones correspondientes, y dicho informe permite establecer si las condiciones mecánicas finales del componente son compatibles con los requerimientos definidos por la especificación CCH70-4 y si el rodete está en condiciones satisfactorias para su reinstalación y operación en la PCH.

5.4.4. METROLOGÍA FINAL

Finalmente, se ejecuta una verificación dimensional mediante metrología convencional para validar que las geometrías reconstruidas en el rodete cumplen con las dimensiones dentro de tolerancias especificadas en los planos originales y que las superficies activas se encuentran dentro de tolerancias aceptables para operación. Esta etapa representa la validación geométrica definitiva, en la cual se confirma que el proceso de soldadura, mecanizado y pulido no generó desviaciones acumuladas que puedan comprometer el rendimiento hidráulico del impulsor.

Para ello, se utilizan los mismos instrumentos aplicados en la recepción: calibradores de alta capacidad (hasta 2 metros), micrómetros de interiores y exteriores, y equipos de medición certificados, en conclusión, se toman nuevamente los puntos de referencia definidos previamente, garantizando coherencia metodológica y evitando sesgos en la interpretación de los resultados, y de esta forma, la comparación dimensional obtenida permite evaluar el nivel de coincidencia entre geometría final y geometría nominal.

Los resultados se registran en un informe de metrología final en el cual se consignan las dimensiones obtenidas, las tolerancias aplicadas y la conformidad o no conformidad de cada sección evaluada, aunado a esto, se incorpora un análisis comparativo entre los datos iniciales de recepción y los datos finales post-reparación, demostrando que la comparación constituye un elemento técnico clave para demostrar la eficacia del proceso de rehabilitación implementado, ya que permite evidenciar el nivel de restauración geométrica lograda.

El cumplimiento satisfactorio de las condiciones dimensionales requeridas por la especificación CCH70-4 es condición final para considerar el rodete apto para operación. De esta forma, la metrología final cierra el ciclo de control de calidad del procedimiento y sustenta formalmente la liberación del componente.

5.5. ENTREGABLES

La estructura metodológica del proyecto establece una secuencia de actividades orientadas a transformar el estado inicial del rodete Francis —caracterizado por desgaste, discontinuidades y pérdida de geometría— en un componente rehabilitado con condiciones similares a las de fabricación original.

La relación entre actividades y entregables es fundamental porque cada fase genera productos verificables que permiten demostrar el cumplimiento de los requerimientos establecidos por la normativa, garantizar la trazabilidad del proceso y comparar el estado de recepción frente al estado final. En proyectos de mantenimiento de turbomáquinas hidráulicas, el éxito técnico no se demuestra únicamente con la puesta en servicio del componente, sino con la evidencia documental que soporte la integridad mecánica, metalúrgica y geométrica obtenida tras la intervención [6], [7]. Por esta razón, el proyecto establece una

cadena lógica de actividades, cada una asociada a uno o varios entregables, que funcionan como hitos de validación.

5.5.1. DIAGNÓSTICO INICIAL E INSPECCIONES DE RECEPCIÓN

Las primeras actividades del proceso —inspección visual, ensayos no destructivos, mediciones de dureza y metrología convencional— generan entregables técnicos que permiten definir la condición real del rodete antes de intervenirlo. La literatura señala que la etapa de diagnóstico es la base para diseñar procedimientos de reparación confiables, ya que evita aplicar tratamientos innecesarios o insuficientes [3].

Por ello, los siguientes entregables constituyen la evidencia inicial:

Actividad	Entregable asociado
Inspección visual	Informe con hallazgos, zonas críticas y evidencia fotográfica
END por partículas magnéticas, tintas penetrantes y ultrasonido	Informes certificados por la empresa contratada
Muestreo de durezas	Registro de durezas en zonas específicas del rodete
Metrología	Plano del componente con medidas reales y desviaciones frente al diseño

Estos entregables no solo confirman el estado físico del componente, sino que permiten definir las zonas a intervenir y establecer los criterios de aceptación posteriores.

5.5.2. ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE REPARACIÓN

Una vez diagnosticado el rodete, el proyecto entra en su segunda fase: la definición del procedimiento de rehabilitación. Aquí, los entregables se orientan a la planeación técnica del proceso. Esto incluye la elaboración del mapeo de discontinuidades, la cuantificación del desgaste y la determinación del método para reconstruir geometrías complejas.

En estudios sobre impulsores Francis y componentes hidráulicos, se ha demostrado que el diseño correcto de plantillas o modelos de referencia mejora la precisión dimensional posterior al mecanizado [6]. Por tanto, los entregables correspondientes son:

- Mapa de defectos del rodete, donde se indican fisuras, zonas erosionadas o discontinuidades.
- Informe de cuantificación de desgastes, comparando la metrología con los planos originales.
- Método de reconstrucción de geometrías complejas, acompañado de la fabricación de plantillas físicas.

Estos documentos permiten que el proceso no dependa únicamente de criterio operativo, sino que responda a datos técnicos verificables.

5.5.3. IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE REHABILITACIÓN

La tercera fase del proyecto corresponde a la ejecución física de la reparación: saneamiento, soldadura, mecanizado, pulido y balanceo dinámico. Cada actividad genera entregables específicos que evidencian la trazabilidad del proceso. Según Ciocoiu et al., la reparación de impulsores sometidos a cavitación y corrosión requiere registros intermedios para evaluar cambios en microestructura, dureza y geometría [3].

Las actividades y entregables en esta etapa son:

Actividad	Entregable
Eliminación de discontinuidades	Informe de inspección posterior al saneamiento, evidenciando ausencia de indicaciones
Soldadura GTAW, SMAW y GMAW	Registros de WPS, PQR y WPQ utilizados, además del informe de aplicación y del alivio térmico
Fabricación de plantillas	Plantillas físicas y registro del método utilizado
Mecanizado final	Registro dimensional comparado con el plano original
Pulido de álabes	Informe técnico con fotografías y verificación geométrica

Balanceo dinámico	Certificado del balanceo realizado por la empresa contratada
-------------------	--

Cada entregable demuestra que la intervención cumplió con las especificaciones técnicas. En especial, el informe de balanceo es un documento crítico, pues la operación del rodete a alta velocidad genera esfuerzos dinámicos capaces de provocar vibraciones y fallas por fatiga si no se controla el desbalance [4].

5.5.4. VALIDACIÓN Y ENTREGA DEL COMPONENTE REHABILITADO

La fase final corresponde a las inspecciones posteriores a la reparación, cuyos entregables permiten certificar que el rodete cumple con la norma y puede entrar nuevamente en operación. Estudios sobre erosión y cavitación en materiales para turbinas muestran que la validación post-reparación es indispensable, ya que garantiza que los aportes metálicos y tratamientos térmicos no comprometan la resistencia del material [7].

Los entregables finales son:

- Informe de inspección visual final, con registro fotográfico y observaciones.
- Informes de END, ejecutados bajo criterios de aceptación establecidos en la CCH70-4, cumpliendo mínimamente con criterio de aceptación clase 2 y nivel 2 en todos los ensayos.
- Informe de durezas finales, evidenciando compatibilidad con los valores de diseño.
- Reporte de metrología final, donde se comparan medidas después del mecanizado con los planos originales.

La entrega de estos documentos asegura al cliente trazabilidad total del proceso y confiabilidad técnica en la rehabilitación. A nivel industrial, la ausencia de documentación intermedia o final puede llevar a la descalificación de la reparación o la pérdida de garantía del componente [6].

Relación integral actividades–entregables–control de calidad

Finalmente, la relación entre actividades y entregables cumple tres funciones esenciales:

- Demostrar conformidad normativa.
Sin informes de inspección, END y metrología, no es posible certificar que la reparación se ajusta a criterios técnicos aceptados.
- Garantizar repetibilidad del proceso.
Si el rodete requiere nuevas intervenciones en el futuro, los informes y plantillas permitirán replicar el trabajo con precisión.
- Reducir riesgos operativos en la central hidroeléctrica.
La entrega del rodete sin documentación validada representa un riesgo de falla catastrófica por vibraciones, cavitación o fatiga [7].

5.6.IMPACTOS ESPERADOS

El procedimiento de rehabilitación aplicado al rodete Francis de una pequeña central hidroeléctrica (PCH) de 15 MW genera impactos significativos en dos dimensiones fundamentales: técnica y ambiental. Estas dimensiones permiten evidenciar no solo la viabilidad del proceso, sino también su pertinencia frente a la operación continua, eficiente y sostenible de las plantas hidroeléctricas. De acuerdo con estudios recientes, la recuperación de componentes hidráulicos mediante soldadura y metodologías de control no destructivo contribuye a extender su vida útil, disminuir la frecuencia de fallas y asegurar la disponibilidad del sistema de generación eléctrica [3][7][11]. En este sentido, el presente capítulo analiza cuantitativamente y cualitativamente los beneficios esperados como resultado de la implementación del procedimiento propuesto.

5.6.1. TÉCNICO

El impacto técnico derivado de la rehabilitación de un rodete Francis en una pequeña central hidroeléctrica de 15 MW se manifiesta principalmente en la recuperación del rendimiento hidráulico, la restauración de la geometría funcional y la mejora en la confiabilidad operativa del conjunto turbina–generador; la aplicación de un procedimiento que integra inspección visual, ensayos no destructivos, soldadura controlada, mecanizado final y balanceo dinámico, permite garantizar que el rodete reparado cumpla con parámetros equivalentes, o en algunos casos

superiores, a aquellos de manufactura original, siempre que se respeten los criterios establecidos por la especificación CCH70-4.

Recuperación del rendimiento hidráulico

El rodete es el elemento responsable de transformar la energía hidráulica del flujo en energía mecánica rotacional, por este motivo, cualquier alteración geométrica en los álabes —como pérdida de perfil, rugosidad excesiva o erosión localizada— puede generar pérdidas energéticas significativas. Ylönen et al. analizaron tres materiales utilizados en rodetes Francis y demostraron que la degradación superficial causada por cavitación y abrasión puede reducir el rendimiento entre un 1 % y 3 % anual si no se realizan procesos de mantenimiento y reconstrucción adecuados [7], de esta manera se pudo evidenciar que al restituir los perfiles mediante soldadura controlada y mecanizado CNC, el rodete recupera su capacidad para dirigir el flujo conforme a su diseño hidrodinámico original, reduciendo turbulencias y remolinos internos que generan pérdidas hidráulicas.

La recuperación del perfil de los álabes es especialmente relevante en pequeñas centrales, donde una disminución del rendimiento del 2 % puede traducirse en pérdidas de miles de megavatios-hora anuales, teniendo en cuenta que la metodología implementada —que incluye la fabricación de plantillas, inspección dimensional y pulido final— permite que las superficies presenten una rugosidad adecuada y una geometría equivalente a la especificación de diseño, mitigando la pérdida de presión y favoreciendo la conversión eficiente de energía hidráulica a mecánica.

Cumplimiento de la especificación CCH70-4

La especificación CCH70-4 establece criterios de aceptación para inspección visual, END de tintas penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido y radiografía en trabajos de reparación de turbinas hidráulicas. Integrar esta normativa al procedimiento técnico garantiza:

- Trazabilidad completa del proceso
- Certificación de personal e instrumentos
- Validación de la calidad metalúrgica final

El uso de END antes, durante y después de la reparación es fundamental, así lo expresa Ciocoiu et al. demostraron que, en componentes de máquinas hidráulicas reparados mediante soldadura, los defectos no detectados —como porosidad interna o grietas no superficiales— son las principales causas de fallas prematuras [3]. Al incorporar inspección líquida, partículas magnéticas y ultrasonido, el procedimiento reduce la probabilidad de defectos latentes y asegura que el material aportado se fusione correctamente con el metal base.

Mejora de la confiabilidad y de la disponibilidad operativa

La confiabilidad del conjunto turbina–generador depende de su capacidad para operar sin fallas durante el mayor tiempo posible. Xu et al. explican que, en sistemas hidroeléctricos, una parte considerable de los eventos de mantenimiento correctivo está asociada a fallas mecánicas en impulsores o elementos giratorios [4]. La restauración geométrica, el balanceo dinámico y el saneamiento de discontinuidades reducen vibraciones, disminuyen la carga en los cojinetes y minimizan esfuerzos no deseados en el eje.

Ayancik et al. afirman que el balanceo dinámico es uno de los factores más determinantes para evitar daños progresivos en turbinas hidráulicas, ya que reduce vibraciones que pueden producir aflojamiento estructural y fatiga acumulada [6]. Con este proceso, el rodete adquiere una distribución de masa uniforme, garantizando operación estable incluso a altas revoluciones.

Por último, la inspección final posterior al mecanizado y soldadura permite certificar el estado del componente, si cumple la especificación CCH70-4, el rodete puede ser reinstalado con plena confianza operativa.

Relevancia para el ciclo de vida del componente

La aplicación del procedimiento propuesto no solo restaura el rodete para su operación inmediata, sino que también influye en el ciclo de vida futuro del equipo. Un rodete con geometría recuperada, superficies pulidas y balanceo adecuado presenta:

- menor desgaste progresivo,
- menor riesgo de falla catastrófica,
- menor tiempo de mantenimiento preventivo,
- mayor eficiencia sostenida.

Esto significa que la máquina puede mantener su desempeño hidráulico durante más tiempo, operar con menores esfuerzos mecánicos y requerir intervenciones menos frecuentes, lo que complementa tanto los impactos económicos como los ambientales descritos en las siguientes secciones.

5.6.2. AMBIENTAL

La reparación de un rodete Francis en lugar de fabricar uno nuevo genera beneficios ambientales altamente significativos, especialmente para pequeñas centrales hidroeléctricas que buscan modelos de operación sostenibles. Al rehabilitar el rodete mediante inspección, soldadura, mecanizado y balanceo, se evita la producción de grandes cantidades de desechos metálicos, se reduce la demanda energética asociada a la fabricación industrial y se limita el uso de materias primas. En un contexto donde la generación hidráulica representa una proporción dominante del suministro eléctrico nacional [1], cualquier mejora en la sostenibilidad de los procesos de mantenimiento tiene repercusión directa en el impacto ambiental del sector energético.

Reducción de desperdicio metálico y preservación de materiales

La fabricación de un rodete nuevo implica el empleo de grandes masas de acero inoxidable, procesos de fundición, tratamiento térmico y arranque de viruta; Cave y Ji describen que la manufactura de impulsores involucra mecanizado intensivo, que convierte hasta el 40 % del material inicial en viruta y desperdicio [14], por el

contrario, la reparación aprovecha el cuerpo principal del rodete y únicamente reconstruye las áreas degradadas mediante soldadura controlada, reduciendo significativamente el volumen de metal descartado.

Desde una perspectiva ecológica, esto significa:

- Menor extracción mineral
- Menor transporte de materias primas
- Menor infraestructura industrial requerida
- Menor generación de residuos metálicos

Además, al conservar el componente original, se evita el descarte de un elemento que normalmente supera los cientos de kilogramos, considerando que una turbina Francis de 15 MW puede tener un rodete de varias toneladas de peso [6], la rehabilitación evita que una pieza completa llegue a disposición final o fundición, donde el reciclaje requiere altas temperaturas y consumo energético.

Disminución de la huella de carbono del proceso productivo

La fabricación de un rodete nuevo no solo implica emisión por transporte y fundición, sino también por su mecanizado y acabado superficial, tanto así que, diversos estudios reportan que la producción industrial de componentes metálicos complejos contribuye de forma significativa a la huella de carbono total del sector de generación, debido al uso intensivo de energía térmica y eléctrica.

En contraste, el procedimiento de rehabilitación implica un consumo energético notablemente menor: se realizan procesos de soldadura localizada, mecanizado específico solo en zonas reparadas y pulido final, y por ende, la utilización de plantillas para reconstruir geometrías optimiza el trabajo de mecanizado, reduciendo tiempos de operación y energía consumida.

Si se compara el ciclo de fabricación completa con el de reparación:

Etapas	Rodete nuevo	Rodete reparado
Fundición y tratamiento térmico	Sí → consumo energético elevado	Requiere tratamiento térmico y soldadura
Mecanizado total	CNC completo en 5 ejes	Mecanizado parcial en áreas reparadas
Transporte y logística	Embalaje y envío internacional frecuente	Solo transporte local
Materiales	Toneladas de acero inoxidable	Kilogramos de aporte metálico

El ahorro energético asociado a evitar la fundición y la manufactura completa reduce la huella de carbono del proceso, contribuyendo a un modelo de generación más sostenible.

Revalorización de componentes y economía circular

La tendencia global en ingeniería industrial apunta a la economía circular, donde los componentes tienen mayor tiempo de vida útil y son reparados o reacondicionados antes de ser reemplazados, para este caso, el rodete se convierte en un activo recuperable, evitando el paradigma de “usar y desechar”.

Autores como Ciocoiu et al. evidencian que las reparaciones con soldadura permiten que los impulsores sigan operando en condiciones hidráulicas exigentes durante largos periodos [3], permitiendo demostrar que la reutilización controlada de maquinaria pesada es técnica y ambientalmente viable.

Rehabilitar componentes no solo reduce desechos, sino que mantiene en operación infraestructuras ya existentes, evitando la necesidad de ampliaciones industriales o nuevas cadenas de fabricación; para PCH ubicadas en zonas remotas, esto implica un doble beneficio: menor dependencia logística y menor impacto ambiental asociado al transporte de maquinaria pesada.

Aporte a la sostenibilidad del sistema hidroeléctrico nacional

Dado que el 74 % de la energía producida en el país proviene de recursos hídricos [1], la sostenibilidad de los equipos mecánicos asociados es esencial para mantener una matriz energética limpia, por eso, cada vez que se evita la fabricación de un

rodete nuevo, se disminuye la huella industrial vinculada a la generación hidráulica, reforzando el carácter renovable y sostenible del sistema.

Además, una turbina con rodete desgastado pierde eficiencia, lo que significa que se requiere mover mayor volumen de agua para producir la misma energía. Esto tiene dos consecuencias ambientales:

- mayor alteración hidráulica en el ecosistema
- mayor desgaste en los componentes por interacción con sólidos

Al recuperar la eficiencia, se requiere menor intervención hidráulica para el mismo nivel de producción, preservando el equilibrio ecológico del cauce.

Menor riesgo ambiental por fallas catastróficas

Cuando un rodete opera con grietas o desgaste severo, existe riesgo de desprendimiento de material, cavitación avanzada o fracturas. Xu et al. muestran que las fallas catastróficas en máquinas hidroeléctricas están relacionadas con pérdidas súbitas de control operacional [4], haciendo que los escenarios pueden provocar fugas, daños estructurales y vertimientos de aceites industriales o lubricantes al agua.

El procedimiento de rehabilitación disminuye esta probabilidad al:

- Detectar discontinuidades mediante END
- Asegurar que la soldadura restaure propiedades mecánicas
- Confirmar integridad con balanceo dinámico y metrología final
- Certificar el cumplimiento de la especificación CCH70-4

Esto convierte la reparación en una medida preventiva ambiental, además de técnica.

6. CASO PARTICULAR

El caso particular se realiza en un rodete Francis de 15MW de la marca Voith. Cuenta con una ingeniería inversa en la cual se determinaron planos de fabricación (ver Figura 6.1), el peso del rodete es de 957Kg y el material base según una espectrometría óptica realizada es un material equivalente a un acero inoxidable martensítico 410.

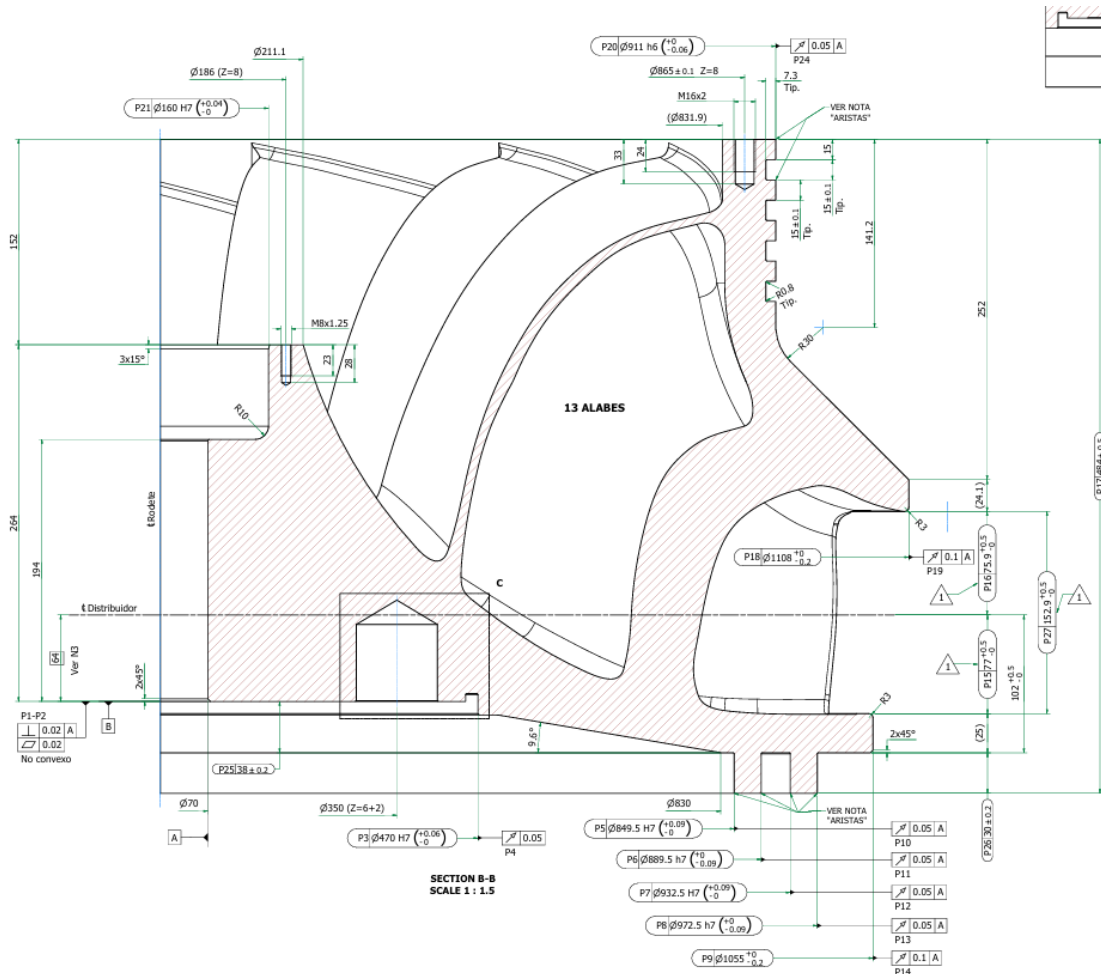


Figura 6.1. Fragmento de plano rodete.

6.1. REQUERIMIENTOS.

6.1.1. INSPECCIÓN VISUAL INICIAL

Previo a la inspección, se realizó una limpieza superficial del rodete, acorde a los lineamientos de la norma **SSPC-SP1** (limpieza con solventes). En este caso no fue necesario realizar limpieza acorde a la norma **SSPC-SP3**, (preparación mecánica

mediante herramientas motorizadas), debido que el rodete no presentaba ningún tipo de recubrimiento o epoxicos cerámicos.

Una vez completada la limpieza, se procedió con la inspección detallada del componente con iluminación directa y herramientas de inspección visual, dicho proceso lo realizó un inspector Nivel 2 calificado, acompañado del equipo técnico de Engicast. Se evidencian zonas desgastadas en las coronas intradós, en la zona intradós y extradós del componente, en el laberinto lado descarga y lado generador, en la Figura 6.1.1.1 se presentan las zonas especificadas del rodete.



Figura 6.1.1.1. Zonas rodete.

Las zonas identificadas con desgastes son las zonas típicas de desgaste en los rodetes Francis, se identificó que los desgastes fueron generados por fenómenos abrasivos causados por sedimentos que contiene el agua turbinada proveniente del río. En la Figura 6.1.1.2. se presenta el desgaste en la zona del extradós de la turbina y en la Figura 6.1.1.3. se presenta el desgaste en la zona intradós.



Figura 6.1.1.2. Desgaste por abrasión en zona extradós rodete.



Figura 6.1.1.3. Desgaste por abrasión en zona intradós rodete.

6.1.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE RECEPCIÓN

El ensayo de tintas penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido fue realizado por un inspector nivel 2, el cual cumple con los requerimientos y competencias requeridas por la práctica recomendada ASNT- TC-1A, 2016, de la American Society For Nondestructive Testing. El inspector pertenece a de una entidad externa.

6.1.2.1. END- TINTAS PENETRANTES

Durante la inspección de este ensayo se identificaron indicaciones de poros en la superficie del material. Dichas indicaciones no cumplen con el criterio de aceptación de la CCH70-4 clase 2, se observan poros que pueden determinarse como clase 2 en la zona del extradós del rodete, mientras que en la zona de

intradós del rodete se identifica un poro que sobrepasa las dimensiones de un poro clase 5 determinado por la CCH 70-4. En la Figura 6.1.2.1.1. se presenta la

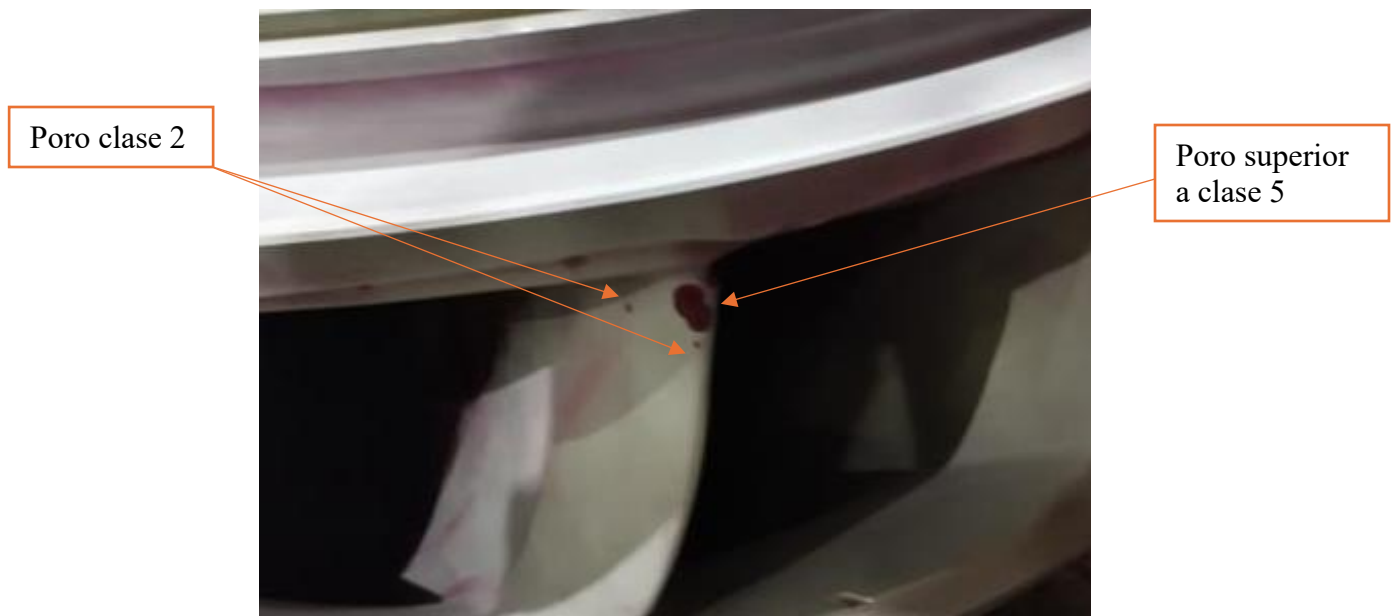


Figura 6.1.2.1.1. Porosidades en alabe 4 del rodete.

indicación más relevante que fue identificada en la superficie del rodete, la cual es un poro con un sangrado con diámetro de 12mm aproximadamente.

Debido que el criterio de aceptación que utilizaremos de la CCH 70-4 para tintas penetrantes es clase 2, se determina que el rodete no cumple con el criterio en los ensayos iniciales.

6.1.2.2. END-PARTICULAS MAGNÉTICAS

Este ensayo se realizó por medio de partículas húmedas fluorescentes por medio de magnetización continua. En la inspección de este ensayo no se identificó ninguna indicación relevante, es decir que la pieza no tiene fisuras o indicaciones subsuperficiales. En la Figura 6.1.2.2.1. se presenta evidencia de la realización de este ensayo en la raíz un alabe en la zona intradós del rodete.

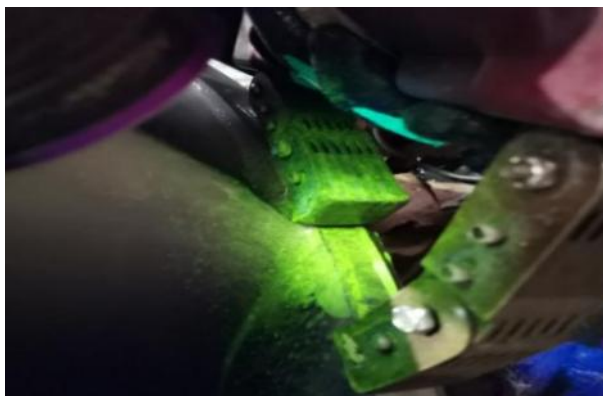


Figura 6.1.2.2.1. Ejecución de partículas magnéticas.

6.1.2.3. END- ULTRASONIDO

Al realizar el ensayo no destructivo de ultrasonido, se realizó inspeccionando espesores de la pieza y buscando indicaciones que pudiesen estar presentes al interior del material. Al finalizar el ensayo no se encontró ninguna indicación relevante dentro de la pieza, pero si variación en los espesores, los cuales indican cual ha sido la perdida de material en la zona extradós de los álabes del rodete, equivalente a 1.5mm en promedio. Este desgaste se determina teniendo en cuenta que el perfil del alabe presenta un espesor casi constante en la zona extradós y en la medición de espesores por ultrasonido se observan variaciones importantes a lo largo de la zona extradós que puede interpretarse como 1.5mm en promedio de desgaste en la zona extradós más cercana al laberinto lado descarga.

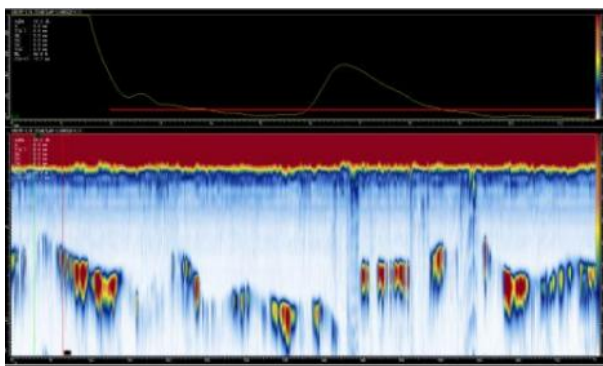


Figura 6.1.2.3.1. Grafica por ultrasonido de espesores.

6.1.3. MUESTREO DE DUREZAS DE RECEPCIÓN

El muestreo de durezas se realizó con un durómetro digital que obtiene la medición de dureza del material por rebote. Previo al inicio de muestreo de durezas, se calibra el equipo con un patrón. En la Figura 6.1.3.1. se presenta evidencia de la toma de durezas del rodete.



Figura 6.1.3.1. Muestreo de durezas en zona extradós del rodete.

Los valores de durezas del rodete pueden resumirse así:

- Dureza en los álabes:
 - Menor valor: 198HB
 - Media de los valores tomados: 320 HB
 - Mayor valor: 415HB
- Dureza en zona encastre del rodete:
 - Menor valor: 229HB
 - Media de los valores tomados: 347 HB
 - Mayor valor: 421HB

A partir de esta información se concluye que las durezas tomadas en el rodete presentan valores normales en su gran mayoría, es decir se encuentran dentro de un rango de [270 – 320] HB, sin embargo, se evidenciaron valores fuera de estos rangos, pero se concluye que la reparación es viable.

6.1.4. METROLOGÍA DE RECEPCIÓN

La metrología inicial se realizó con instrumentos calibrados y/o verificados. Esta metrología se realiza con dos métodos: metrología convencional con calibradores,

profundímetros y micrómetros, el segundo método se realiza con metrología brazo faro el cual funciona tecnología CMM, este instrumento se utilizó para obtener el estado inicial del encastre, obteniendo las coordenadas de cada agujero. A partir de la metrología convencional, se dimensionó el desgaste del rodete y se evidencia que se presentan desgastes de hasta 3mm en los laberintos y diámetros exteriores del rodete. La metrología fue realizada en las cotas protocoladas del plano del rodete, el cual se encuentra en los anexos de este documento.

6.1.5. ENTREGABLES REQUERIMIENTOS

Los entregables de la fase de requerimientos constan de:

ALABE #	IMAGEN	OBSERVACIONES ALABES ZONA PRINCIPAL
1A		Perdida de material por abrasión en la raíz del alabe lado descarga. Se recomienda reconstruir el contorno original mediante soldadura que tenga las mismas propiedades metalúrgicas y magnéticas que el material del rodete.
2A		Perdida de material por abrasión en la raíz del alabe lado descarga. Se recomienda reconstruir el contorno original mediante soldadura que tenga las mismas propiedades metalúrgicas y magnéticas que el material del rodete.
3A		Perdida de material por abrasión en la raíz del alabe lado descarga. Se recomienda reconstruir el contorno original mediante soldadura que tenga las mismas propiedades metalúrgicas y magnéticas que el material del rodete.

Figura 6.1.5.1. Sección de informe inspección visual.

- Informe inspección visual: En la Figura 6.1.5.1. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos. Los alabes se encuentran con pérdida de material por abrasión.

- Informe END-Tintas penetrantes: En la Figura 6.1.5.2. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos. En la figura puede observarse que la interpretación es rechazable, debido que el criterio de aceptación es la CCH 70-4 clase 2.

	
INDICACIONES ALABE 7B	INDICACIONES ALABE 8B
INTERPRETACIÓN	
ACEPTABLE ☐	RECHAZABLE ☒
HALLAZGOS – COMENTARIOS GENERALES	
<i>Se inspeccionó el Rodete Francis tanto en la parte inferior como superior y se evidencian múltiples indicaciones, principalmente porosidades y pérdidas de material en todos los álabes del rodete producto de la cavitación.</i>	

Figura 6.1.5.2. Sección de informe END-PT.

- Informe END-partículas magnéticas: En la Figura 6.1.5.3. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos.

TIPOS DE CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN						
Corriente Alterna (AC) ☒	Corriente Alterna Rectificada de Media Onda: ☐		Corriente Alterna Rectificada de Onda Completa ☐		Corriente Directa (DC) ☐	
TÉCNICA DE MAGNETIZACIÓN						
Continua ☒			Residual ☐			
DIRECCIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO						
Magnetización Circular ☐		Magnetización Longitudinal ☐		Magnetización Multidireccional ☒		
MÉTODO UTILIZADO						
Visibles Secas ☐ LUX	Visibles Húmedas ☐ LUX	Fluorescentes Secas ☐ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$		Fluorescentes Húmedas ☒ 1/100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$		
Junta	Longitud inspeccionada	Longitud de indicación	Tipo de indicación	Interpretación		Comentarios
				Ok	R	
Parte Superior Rodete	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Parte Inferior Rodete	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #1	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #2	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #3	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #4	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #5	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #6	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #7	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #8	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #9	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #10	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #11	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #12	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
Álabe Rodete #13	Variable	-----	-----	-	X	Perdida de material
INTERPRETACIÓN						
ACEPTABLE ☐				RECHAZABLE ☒		

Figura 6.1.5.3. Sección de informe END-MT.

En la Figura 6.1.5.3, se presenta en una tabla los resultados de partículas magnéticas, en el cual se está rechazando la pieza debido que la pieza presenta perdida de material, mas no se identifica ninguna indicación relevante por medio del ensayo de partículas magnéticas.

- Informe END-Ultrasonido: En la Figura 6.1.5.4. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos. Se observa variación de espesores en el mayor valor y el menor valor entre los alabes. Este ensayo se realiza por medio de un palpador angular calibrado para el material del rodete.

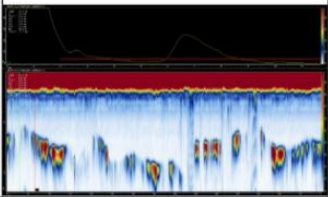
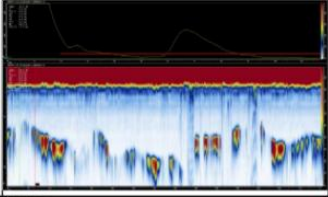
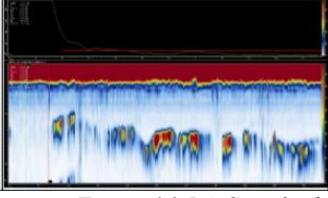
Álabe #	IMAGEN	COMENTARIOS ALABE ZONA INFERIOR
6		Se observa un espesor mayor de 9.6 mm y un espesor menor de 5.7 mm
7		Se observa un espesor mayor de 9.2 mm y un espesor menor de 6.2 mm
8		Se observa un espesor mayor de 9.4 mm y un espesor menor de 6.3 mm

Figura 6.1.5.4. Sección de informe END-UT.

- Informe END-Durezas: En la Figura 6.1.5.5. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos. En la Figura 6.1.5.5. se presenta los resultados en los alabes fijos de la zona intradós, los cuales están numerados y se les realizó tres muestras de dureza por cada uno. Adicionalmente se presenta el valor mayor, medio y menor de durezas en dicha zona.

REGISTRO DUREZAS					
AREA INSPECCIONADA	Rodete : Alabes fijos lado Intrados			VALOR MAYOR	415
				VALOR MEDIO	320
				VALOR MENOR	198
ALABE #	Medida I	Medida II	Medida III	NOTA: Se presenta un diagrama de ubicación de mediciones. Se tomaron 3 mediciones en los alabes fijos intrados.	
Alabe A1	319	198	324		
Alabe A2	242	318	338		
Alabe A3	339	272	327		
Alabe A4	259	316	328		
Alabe A5	321	319	327		
Alabe A6	330	260	343		
Alabe A7	379	284	326		
Alabe A8	415	260	327		
Alabe A9	284	235	320		
Alabe A10	384	206	319		
Alabe A11	329	400	338		
Alabe A12	313	275	310		
Alabe A13	240	342	336		
				NOTA: Todas las medidas en Brinell (HB)	

AREA INSPECCIONADA	Rodete : Alabes fijos lados intrados	
MARCACION DE REFERENCIA		
		

Figura 6.1.5.5. Sección de informe END-Durezas.

- Informe de Metrología rodete: En la Figura 6.1.5.6. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos.

INFORMACIÓN REFERENCIAL										
PLANO CLIENTE				N/A		PARÁMETROS DE MEDICIÓN: Verificación de dimensiones con tolerancias empleando medición convencional. 				
PLANO FABRICANTE				N/A						
PLANO ENGICAST				ENG-PL-MEC-12177-101						
OTROS DOCUMENTOS:				N/A						
SISTEMA UNIDADES				Sistema internacional de unidades (SI)						
REGISTRO DE MEDICIÓN										
COTA No.	DIMENSIÓN	DIM. MÁX.	DIM. MÍN.	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MEDIDA 4	CONFORME	INSTRUMENTO	OBSERVACIONES
P3	ØExt. 470 H7	470,06	470	470,06	470,05	470,06	470,04	CONFORME	CAL-42	Presenta desgaste en la superficie
P5	ØInt. 849,5 H7	849,59	849,5	849,01	850,19	849,75	850,15	NO CONFORME	CAL-42	Presenta desgaste en la superficie
P6	ØExt. 889,5h7	889,5	889,41	888,59	888,45	888,68	888,55	NO CONFORME	CAL-42	Presenta desgaste en la superficie
P7	ØInt. 932,5 H7	932,59	932,5	933,28	932,83	933,24	933,12	NO CONFORME	CAL-42	Presenta desgaste en la superficie
P8	ØExt. 972,5	972,5	972,41	971,65	971,73	971,7	971,69	NO CONFORME	CAL-42	Presenta desgaste en la superficie
P9	ØExt. 1055	1055	1054,8	1054,54	1054,43	1054,65	1051,48	NO CONFORME	CAL-42	Presenta desgaste en la superficie
P20	ØExt. 911 h6	911	910,94	908,48	907,83	909,03	909,03	NO CONFORME	CAL-42	Presenta desgaste en la superficie
P21	ØInt. 160 H7	160,04	160	159,99	160	160,02	160,01	NO CONFORME	MCR-40	
P26	H 30	30,2	29,8	30,6	31	33,06	33,15	NO CONFORME	PRO-08	Presenta desgaste excesivo en el fondo de ranura

Figura 6.1.5.6. Sección de informe metrologías.

El informe presentado en la Figura 6.1.5.6 presenta las mediciones en las medidas protocoladas del plano del rodete, las cuales cuentan con unas tolerancias dimensionales, los valores que se encuentran en rojo son las mediciones que se encuentran fuera de tolerancias, por lo tanto no están conformes.

6.2. PROCEDIMIENTO

A partir de los resultados obtenidos anteriormente, se analizan los datos y se define una ruta de intervención.

6.2.1. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DETECTADOS POR MEDIO DE LAS INSPECCIONES REALIZADAS ANTERIORMENTE

La identificación de los puntos críticos se llevó a cabo mediante un mapeo de defectos, entendido como el informe consolidado que integra los resultados de todos los ensayos no destructivos (END) realizados sobre el rodete. Tal como se evidenció en los resultados de la fase de requerimientos, las indicaciones relevantes que debían ser intervenidas antes de cualquier proceso de soldadura correspondieron principalmente a porosidades superficiales detectadas por el ensayo de líquidos penetrantes, los cuales fueron clasificados como los puntos críticos durante el proceso de reparación. Todas las indicaciones identificadas durante la inspección por ensayos no destructivos deben eliminarse por medio de un saneado de la superficie utilizando herramientas motorizadas antes de cualquier intervención por soldadura.

Adicionalmente, se determinó la necesidad de aplicar soldadura en las zonas del intradós y extradós que presentaban desgaste por abrasión, identificado tanto en la inspección visual como en la evaluación de espesores mediante ultrasonido. Estas áreas degradadas requieren igualmente una preparación superficial previa al inicio de las actividades de soldadura para garantizar la adecuada adherencia y calidad del depósito metálico.

6.2.2. CUANTIFICACIÓN DEL DESGASTE EN EL RODETE

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Metrología convencional y las mediciones solicitadas en plano, se requirió recuperar los diámetros exteriores del rodete un aproximado de 3mm, lo cual implicó aplicar un aproximado de 7mm de

soldadura por medio de GMAW al diámetro para obtener un mecanizado final sin socavados ni vacíos que pudiesen generar los entrepases de la soldadura. En las zonas identificadas por ultrasonido en el extradós de los álabes con desgastes de 1.5mm aproximadamente, implicó aplicar espesores de soldadura de aproximadamente 3mm por medio de SMAW. Todos los aportes de soldadura se realizaron con material de aporte 410, que es el equivalente al material base. Para definir el material de aporte, se realizó una estequiometría óptica del material base, lo que permitió identificar que el aporte de soldadura inoxidable 410 es la más adecuada para la reparación de este rodete.

Debido que la recuperación dimensional del rodete requiere intervención por soldadura, es de gran importancia realizar un alivio de tensiones para eliminar los esfuerzos residuales que genera la soldadura. Por otro lado, el aporte de material en diferentes zonas del rodete cambia la distribución de masa del mismo, por lo tanto, se debe realizar un balanceo dinámico, el cual consta de eliminar material por medio de pulido en la zona de balanceo especificada en plano.

6.2.3. DEFINIR MÉTODO PARA RECONSTRUIR GEOMETRÍAS COMPLEJAS

El método empleado para la reconstrucción geométrica de los álabes consistió en la fabricación de plantillas físicas de referencia. Para ello, se seleccionó el alabe con menor nivel de desgaste y se utilizó como modelo para definir la geometría objetivo. La selección de este alabe se realizó mediante un escaneo tridimensional del rodete, cuyos resultados permitieron superponer digitalmente todos los álabes y determinar aquel cuya geometría presentaba el menor desgaste y por consiguiente la menor desviación respecto geometría.

A partir del alabe seleccionado, se procedió a fabricar diferentes plantillas metálicas que representaran su perfil. El proceso de fabricación consistió en cortar y doblar láminas metálicas hasta reproducir la geometría del alabe. Una vez obtenido el perfil requerido, a cada plantilla se le soldaron bases de apoyo, diseñadas para posicionarse correctamente mediante puntos de referencia fijos del rodete, como los diámetros exteriores. Estas plantillas permitieron guiar de manera precisa la

reconstrucción geométrica de los álabes durante las fases posteriores de reparación.

Las platillas lograron describir tanto la geometría de los álabes como la separación entre ellos, lo que es una variable importante en el funcionamiento del rodete.

6.2.4. ENTREGABLES FASE DE PROCEDIMIENTO

- Informe mapeo de defectos: En la Figura 6.2.4.1. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos.

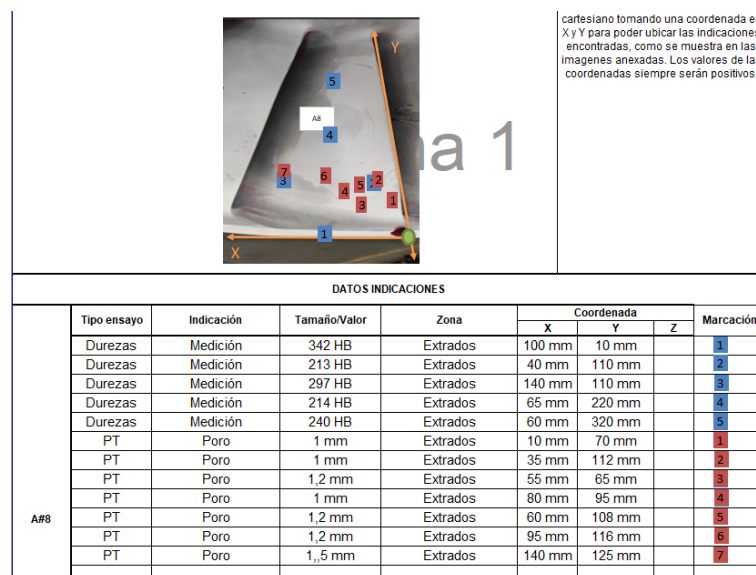


Figura 6.2.4.1. Sección de informe mapeo de defectos.

- Informe diagnóstico inicial: Este informe cuantifica los desgastes identificados en el rodete y consolida los resultados de los END. En la Figura 6.2.4.2. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos. La figura presenta específicamente los resultados a partir de la metrología, cuantificando el valor de los desgastes, teniendo como referencia el plano.

4.2 METROLOGÍA

La metrología realizada se presenta en el documento "ENG-MRH-FR-003 - INICIAL – RODETE SMT E4", donde se evidencia desgaste en los alabes, las coronas y los laberintos. Esto se puede apreciar tanto en las metrologías como en los ensayos no destructivos previamente descritos. A continuación, se presentan las medidas fuera de tolerancia:

Cota P5: La medida máxima aceptada según plano es de 849.59mm; sin embargo, la metrología demuestra que el diámetro se encuentra en 850.15mm. No cumple con las tolerancias del plano por una diferencia de 0.56 milímetros.

Cota P6: La medida mínima aceptada según plano es de 889.41mm; sin embargo, la metrología demuestra que el diámetro se encuentra en 888.59mm. No cumple con las tolerancias del plano por una diferencia de 0.82 milímetros.

Cota P7: La medida máxima aceptada según plano es de 932.5mm; sin embargo, la metrología demuestra que el diámetro se encuentra en 933.24mm. No cumple con las tolerancias del plano por una diferencia de 0.65 milímetros.

Cota P8: La medida mínima aceptada según plano es de 972.5mm; sin embargo, la metrología demuestra que el diámetro se encuentra en 971.7mm. No cumple con las tolerancias del plano por una diferencia de 0.71 milímetros.

Cota P9: La medida mínima aceptada según plano es de 1054.8mm; sin embargo, la metrología demuestra que el diámetro se encuentra en 1054.43mm. No cumple con las tolerancias del plano por una diferencia de 0.37 milímetros.

Cota P20: La medida mínima aceptada según plano es de 910.94mm; sin embargo, la metrología demuestra que el diámetro se encuentra en 908.48mm. No cumple con las tolerancias del plano por una **diferencia de 2.46 milímetros**.

Cota P26: La medida máxima aceptada según plano es de 30.2mm; sin embargo, la metrología demuestra que el diámetro se encuentra en 33.06mm. No cumple con las tolerancias del plano por una **diferencia de 2.86 milímetros**.

Se evidencian desgastes normales y desgastes avanzados. Los desgastes mayores se encuentran en la cota P20 y la cota P26, los cuales requieren mayor aporte de soldadura.

Figura 6.2.4.2. Sección de informe diagnóstico inicial.

6.3. APLICACIÓN

6.3.1. ELIMINACIÓN DE DISCONTINUIDADES

La eliminación de las discontinuidades encontradas en los END se llevó a cabo siguiendo las indicaciones de la norma SSPC-SP3, utilizando herramientas motorizadas con fresas metálicas para remover el material defectuoso. Este mismo método se aplicó para preparar las zonas de los álabes donde, según las inspecciones iniciales, era necesario depositar soldadura debido al desgaste presente. Este procedimiento puede observarse en la Figura 6.3.1.1.



Figura 6.3.1.1. Preparación superficial.

En cuanto a los diámetros que estaban cerca de la medida final, se decidió mecanizarlos en un torno vertical, retirando aproximadamente 1 mm de material al radio. Esta precaución se tomó para evitar que la medida final coincidiera con alguna zona que pudiera verse afectada por la fusión entre la soldadura y el material base. Después de completar la limpieza mecánica, se aplicó un ensayo de líquidos penetrantes con el fin de confirmar que no quedaran imperfecciones superficiales. Para cerrar el proceso de preparación, se realizó una última limpieza conforme a la norma SSPC-SP1, utilizando solventes para eliminar grasa o suciedad que pudiera interferir con la calidad de la soldadura. Con estas etapas, la superficie quedó debidamente acondicionada para recibir el material de aporte.

6.3.2. APLICACIÓN DE SOLDADURA

Una vez saneadas las discontinuidades, se procedió a la fase de reconstrucción volumétrica mediante soldadura, es en este paso que el proceso seleccionado como método central de aporte metálico es el proceso de soldadura por electrodo revestido SMAW (Shield Metal Arc Welding) y aporte por alambre tubular GMAW (Gas Metal Arc Welding).

La elección de SMAW como proceso principal se fundamenta en su alta aplicabilidad industrial en el contexto nacional, su versatilidad para aportar material en zonas complejas como los álabes. El procedimiento por GMAW se realizó en los diámetros externos del rodete, debido a que se puede aplicar por un método semiautomático, con dicho procedimiento se obtuvo mejores tiempos de aplicación de soldadura y una aplicación más homogénea.

Antes de iniciar el proceso de soldadura, se seleccionó como material de aporte acero inoxidable martensítico 410, debido a que es un material equivalente al material base del rodete, como se verificó previamente mediante una estequiometría óptica del material base.

Previo a cualquier aplicación de soldadura en la pieza se ha elaborado un WPS (Especificación del proceso de soldadura) el cual se elaboró bajo la normativa ASME sección 9, PQR (registro de calificación del procedimiento) el cual es muy importante, debido a que avala que el procedimiento especificado en el WPS es aprobado Y WPQ (calificación del soldador) que avala al soldador que se ha calificado para el WPS, solo los soldadores calificados pueden realizar la aplicación de soldadura. De esta manera, se garantiza que la aplicación de soldadura será adecuada y se ha comprobado en probetas por medio de ensayos a flexión de estas, al mismo tiempo se ha realizado con los soldadores que intervendrán la pieza y han sido calificados para los procesos de soldadura a ejecutar.

Para iniciar el procedimiento de soldadura se precalienta la pieza a 120°C, lo cual es una temperatura que se encuentra dentro del rango requerido por el WPS. Este procedimiento se realiza con una antorcha de gas y se pone a girar la pieza en un posicionador. Una vez la pieza se encontraba en un rango de temperatura óptimo, se inició la intervención por soldadura y se mantuvo un monitoreo constante de la temperatura de la pieza durante todo el proceso, en la Figura 6.3.2.1. se presenta la aplicación de soldadura y el monitoreo de temperaturas simultáneamente.



Figura 6.3.2.1. Intervención soldada por medio de SMAW con soldador calificado.

Durante el procedimiento se realizó inspección visual intermedia por control de calidad, adicionalmente se realizaban limpiezas entre los pases de soldadura con discos de pulir y gratas radiales para materiales de acero inoxidable.

El aporte de material por medio de soldadura se realizó las 24 horas del día, en las cuales durante las paradas por alimentación y pausas activas, se protegió el rodete con mantas térmicas, esto con la finalidad de no aportar ciclos térmicos a las piezas. El tiempo total de aplicación de soldadura al rodete fue de aproximadamente 3 semanas.

Una vez finalizada la aplicación de soldadura, realizó una aproximación dimensional y se inspeccionaron todas las zonas soldadas por medio de tintas penetrantes, de esta manera se determinó que el rodete se encontraba en óptimas condiciones para proceder con el alivio de tensiones. El alivio de tensiones se realizó en un horno eléctrico con deltas de temperaturas, respecto al precalentamiento (120°C), inferiores a 40°C entre la termocupla con temperatura más alta y la termocupla con menor temperatura, en la Figura 6.3.2.2. se presenta el rodete momentos antes de iniciar el alivio de tensiones junto con otros componentes de turbina.



Figura 6.3.2.2. Momento previo al alivio de tensiones.

Finalmente se realizó un informe con la curva de temperatura del alivio de tensiones aplicada al rodete.

6.3.3. FABRICACIÓN DE PLANTILLAS

Se fabricaron las plantillas del rodete acorde a lo planteado en el capítulo 5.2.3. En la Figura 6.3.3.1 se presenta la malla del escaneo del rodete con la que se superpusieron los álabes del rodete y se escogió el alabe con el que se realizaron las plantillas, el cual fue replicado.

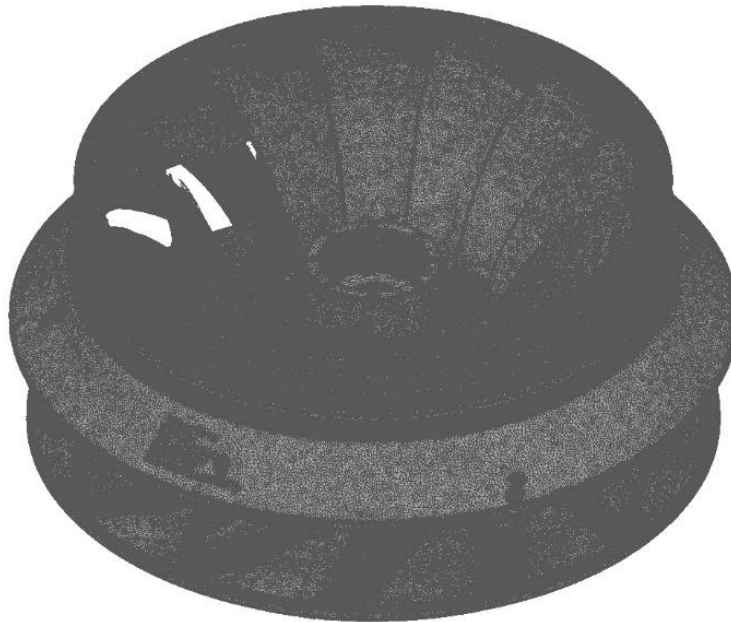


Figura 6.3.3.1. Malla generada por el escaneo 3D del rodete.

En la Figura 6.3.3.2 se presenta el resultado final de una de las plantillas fabricadas, la cual se utiliza para describir la curvatura del alabe y el distanciamiento entre los mismos.



Figura 6.3.3.2. Plantilla alabe zona extradós.

6.3.4. MECANIZADO FINAL

El mecanizado se lleva a cabo mediante un torno vertical, en el cual se generan las medidas especificadas en el plano (ver plano en anexos). En esta máquina se realizó el mecanizado de todos los diámetros externos e internos del rodete, garantizando los ajustes que solicita el plano. El proceso de mecanizado inició centrando la pieza con las zonas de referencia especificadas en plano, que son el diámetro del encastre, posteriormente se realizó el mecanizado final de la pieza. En la Figura 6.3.4.1. se presenta un instante durante este procedimiento.



Figura 6.3.4.1. Mecanizado final del rodete.

Al finalizar el mecanizado final en el torno vertical, se montó el rodete en un centro de mecanizado CNC para verificar los diámetros y posiciones del encastre, en los cuales se evidenció que debido al alivio de tensiones se habían cerrado los diámetros del encastre, por lo que se ajustaron esos diámetros según lo solicitado por plano. Para este mecanizado, la pieza se centra a partir de los diámetros mecanizados en el torno vertical.

Finalmente se realizó un control por metrología convencional para verificar que todas las medidas se encontraran según lo especificado en el plano.

6.3.5. PULIDO DE GEOMETRÍAS COMPLEJAS

Posterior al mecanizado final, se ejecutó el proceso de pulido de superficies críticas, principalmente en los álabes, con el objetivo de eliminar irregularidades y brindar la geometría determinada por las plantillas previamente fabricadas, adicionalmente se deben eliminar marcas de corte y transiciones abruptas que puedan afectar el comportamiento hidráulico del flujo; el pulido constituye una etapa final de refinamiento superficial que contribuye a optimizar la eficiencia hidráulica, ya que superficies rugosas elevan las pérdidas por fricción, inducen turbulencias no deseadas y alteran la adherencia del flujo sobre los perfiles hidrodinámicos.

Para realizar el pulido se emplearon herramientas rotativas tales como rotoesferas, piedras abrasivas, rotolijas y discos de desbaste de grano progresivo, permitiendo ajustar la textura superficial mediante secuencias controladas.

Al terminar el pulido se verifico que las geometrías de los álabes se encontraran acorde a plantillas, como se presenta en la Figura 6.3.5.1.



Figura 6.3.5.1. Verificación geométrica por plantillas.

Una vez se generaron todas las geometrías de los álabes, de realizo un pulido de presentación en el rodete, obteniendo el resultado presentado en la Figura 6.3.5.2.



Figura 6.3.5.2. Rodete con acabado final.

6.3.6. BALANCEO DINÁMICO

Se realizó un balanceo dinámico a las revoluciones en las que trabaja este rodete, que son 800 RPM. En la Figura 6.3.6.1. se puede observar el momento en el que se estaba realizando este procedimiento.



Figura 6.3.6.1. Balanceo dinámico.

6.3.7. ENTREGABLES APLICACIÓN

- Informe tintas penetrantes posterior a saneado: En la Figura 6.3.7.1. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos.

MARCACIONES DE REFERENCIA																																																
ZONA A INSPECCIONAR	ZONA FRANJA PERIMETRAL LADO EXTRADOS																																															
MARCACION DE REFERENCIA (FORMA SIN MATRIZ - UNIDADES) PQ CORDA 19532 PQ CINDO 19532/29015 CLIENTE HNV FABRICANTE VOLTH HYDRO.	Nota: En el ensayo de PT se toma como referencia la marcación inicial de los alabes intrados. Para la inspección se limita una zona teniendo como referencia la longitud externa de los alabes extrados (línea roja) y se ubica un punto de origen (punto verde) en el plano cartesiano tomando una coordenada en X y Y para poder ubicar las indicaciones encontradas, como se muestra en las imágenes anexas. Los valores de las coordenadas siempre serán positivos.																																															
DATOS INDICACIONES																																																
LINEAL	REDONDEADA	INTERPRETACION																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Indicacion #</th> <th>Tamaño</th> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Indicacion #	Tamaño	X	Y	A1																<table border="1"> <thead> <tr> <th>Indicacion #</th> <th>Tamaño</th> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Indicacion #	Tamaño	X	Y	A1																<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>R</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td></td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>R</td> </tr> </tbody> </table>	A	R	X		A	R
Indicacion #	Tamaño	X	Y																																													
A1																																																
Indicacion #	Tamaño	X	Y																																													
A1																																																
A	R																																															
X																																																
A	R																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Indicacion #</th> <th>Tamaño</th> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A2</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Indicacion #	Tamaño	X	Y	A2																<table border="1"> <thead> <tr> <th>Indicacion #</th> <th>Tamaño</th> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A2</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> </td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Indicacion #	Tamaño	X	Y	A2																<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>R</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td></td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>R</td> </tr> </tbody> </table>	A	R	X		A	R
Indicacion #	Tamaño	X	Y																																													
A2																																																
Indicacion #	Tamaño	X	Y																																													
A2																																																
A	R																																															
X																																																
A	R																																															

Figura 6.3.7.1. Informe partículas magnéticas.

- PQR, WPQ y WPS: En la Figura 6.3.7.2. se presenta parte del procedimiento WPS, el informe completo se presenta en anexos.

ENGICAST		WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)		CODE	ENG-ASME-FR-SOL-004								
				VERSION	3								
				DATE	11/08/2021								
				SHEET	1 OF 2								
COMPANY NAME :		ENGICAST S.A.S		REV. :	0								
WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS WPS No. :		ENG-041		DATE :	October 4th, 2021								
SUPPORTING PQR No. :		ENG-041											
WELDING PROCESS (S) :		SMAW / GMAW		TYPE :	MANUAL / SEMIAUTOMATIC								
JOINT DETAIL :		TYPICAL JOINT DETAIL											
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">JOINT GEOMETRY</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GROOVE ANGLE :</td> <td>60°</td> </tr> <tr> <td>ROOT FACE (C) :</td> <td>1/8" (3.2mm)</td> </tr> <tr> <td>ROOT SPACING (R) :</td> <td>1/8" to 3/16" (3mm to 4.7mm)</td> </tr> </tbody> </table>		JOINT GEOMETRY		GROOVE ANGLE :	60°	ROOT FACE (C) :	1/8" (3.2mm)	ROOT SPACING (R) :	1/8" to 3/16" (3mm to 4.7mm)				
JOINT GEOMETRY													
GROOVE ANGLE :	60°												
ROOT FACE (C) :	1/8" (3.2mm)												
ROOT SPACING (R) :	1/8" to 3/16" (3mm to 4.7mm)												
Note: For other joint details see manufacturing drawings.													
GROOVE DESIGN :		Single Groove weld, Double V Groove weld, Fillet, Butto Up		BACKING :	SMAW ☐ Wire GMAW ☐ Wire								
BACKING MATERIAL :		Base Metal / Weld		RETAINERS :	None								
BASE METALS (QW 403)		X3CrNiMo16N7-2.1 A743 CA18NM											
MATERIAL SPECIFICATION 1 :		X3CrNiMo16N7-2.1 A743 CA18NM		MATERIAL SPECIFICATION 2 :									
QUALIFIED THICKNESS RANGE (QW 403.6)		GROOVE : 3/16" to 3/8" (5mm to 20mm)		FILLET : All Sizes									
FILLER METALS		FIRST PROCESS : SMAW		SECOND PROCESS : GMAW									
F-No. (QW 404.4)		4		0									
A-Rat. (QW 404.5)		E610NiMo-15 (prod.)		E610NiMo (prod.)									
SPECIFICATION No. (SFA) (QW 403)		5.4		5.22									
AWS No. (SFA Class) (QW 404.3)		E610NiMo-15 (prod.)		E610NiMo (prod.)									
SIZE OF FILLER METAL (QW 404.3)		Dia. 1/8" (3.2mm)		Dia. 1/8" (3.2mm)									
WELD DEPOSITED (g) (QW 404.3)		8" (200mm) Maximum		8" (200mm) Maximum									
GROOVE FILLET (QW 403.6)		Unfillet		Unfillet									
(U) PASS > 1/2" (QW 403.6)		NOT ALLOWED		NOT ALLOWED									
FILLER METAL TRADE NAME (QW 404.3)		BOHLER		BOHLER									
FILLER METAL PRODUCT FORM (QW 404.3)		NA		FLUX COATED (METAL CORE)									
OTHERS													
GMAW													
SUPPLEMENTAL FILLER (QW 404.3)		NONE											
ALLOY ELEMENT (QW 404.3)		NONE											

Figura 6.3.7.2. WPS para soldadura.

- Informe de balanceo dinámico: En la Figura 6.3.7.3. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos.

CERTIFICADO EQUILIBR. ROTOR

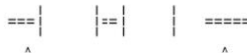
FECHA OCTUBRE 23 DE 2025 HORA

CLIENTE ENGICAST O/N

CERTIFICADO REF.

ROTOR RUEDA FRANCYS

CONFIGURACION ROTOR



PESO PRUEBA IZDA	250 g	
RADIO PRUEBA IZDA	500 mm	
RADIO CORR. IZDA	500 mm	0-5 gr EXCELENTE
ANGL. PRUEBA IZDA	0 deg	
PESO PRUEBA DCHT	g	6-20 gr ACEPTABLE
RADIO PRUEBA DCHT	mm	
RADIO CORR. DCHT	mm	21-50 gr REGULAR
ANGL. PRUEBA DCHT	deg	



Figura 6.3.7.3. Informe balanceo dinámico.

6.4. COMPROBACIÓN

6.4.1. INSPECCIÓN VISUAL FINAL

La valoración se realizó nuevamente sobre superficies limpias, siguiendo el procedimiento de preparación superficial establecido en la norma SSPC-SP1 garantizando que no existan contaminantes que oculten imperfecciones; la inspección fue ejecutada por un inspector Nivel 2 calificado de una entidad externa. Durante la inspección visual no se encontró ninguna indicación relevante.

6.4.2. END FINALES

Posteriormente a la inspección visual final, se ejecutó nuevamente los ensayos no destructivos (END) con el fin de verificar la integridad de las zonas intervenidas. Los ensayos no destructivos se realizaron en todo el rodete con el fin de confirmar que las zonas intervenidas cumplieran los criterios de aceptación de la especificación CCH70-4 y que en las zonas no intervenidas por soldadura también se encuentren en optimas condiciones, descartando que no se generara ninguna discontinuidad en el proceso por el alivio térmico.

Todos los ensayos se realizaron por una entidad externa y por un inspector nivel 2 para cada uno de los ensayos.

6.4.2.1. END- TINTAS PENETRANTES

Durante la inspección de este ensayo no se identificaron indicaciones relevantes de poros en la superficie del material. Por lo tanto, se cumple con los criterios de la especificación CCH70-4 clase 1. En la Figura 6.4.2.1.1. se presenta el resultado en una zona del rodete.



Figura 6.4.2.1.1. Ensayo de tintas penetrantes en el rodete.

6.4.2.2. END-PARTICULAS MAGNÉTICAS

Este ensayo se realizó por medio de partículas húmedas fluorescentes por medio de magnetización continua. En la inspección de este ensayo no se identificó ninguna indicación relevante, es decir que la pieza no tiene fisuras o indicaciones subsuperficiales y cumple con los criterios de aceptación de la especificación CCH70-4 clase 1. En la Figura 6.4.2.2.1. se presenta evidencia de la realización de este ensayo.



Figura 6.4.2.2.1. Ejecución de partículas magnéticas.

6.4.2.3. END- ULTRASONIDO

Al realizar el ensayo no destructivo de ultrasonido, se realizó inspeccionando espesores de la pieza y buscando indicaciones que pudiesen estar presentes al interior del material. Al finalizar el ensayo no se encontró ninguna indicación relevante. En la Figura 6.4.2.3.1 se presenta un momento en el que se realizó este ensayo.



Figura 11.4.2.3.1. Grafica por ultrasonido de espesores.

6.4.3. MUESTREO DE DUREZAS DE LIBERACIÓN

El muestreo de durezas se realizó con un durómetro digital que obtiene la medición de dureza del material por rebote. Previo al inicio de muestreo de durezas, se calibra el equipo con un patrón. En la Figura 6.4.3.1. se presenta evidencia de la toma de durezas del rodete.



Figura 6.4.3.1. Muestreo de durezas en zona extradós del rodete.

Los valores de durezas del rodete pueden resumirse así:

- Dureza en los álabes:
 - Menor valor: 218HB
 - Media de los valores tomados: 284 HB
 - Mayor valor: 325HB
- Dureza en zona encastre del rodete:
 - Menor valor: 231HB
 - Media de los valores tomados: 322 HB
 - Mayor valor: 348HB

A partir de esta información se concluye que las durezas tomadas en el rodete presentan valores normales en su gran mayoría, es decir se encontraron dentro de un rango de [270 – 320] HB, adicionalmente, se observó una mejora de en el rango de los valores de dureza en el rodete en comparación con las durezas iniciales. Inicialmente la media de los valores de dureza en los álabes se encontraba en el máximo dentro del rango de 270 – 320 HB y los valores de dureza en el encastre

se encontraban los valores de dureza por encima del rango un 8%, mientras que el resultado final se observa en los alabes la media de los valores tomados dentro del rango y en el encastre se observa la media de los valores tomados un 0.6% por encima del rango.

6.4.4. METROLOGÍA DE LIBERACIÓN

La metrología de liberación se realizó con instrumentos calibrados y/o verificados. Esta metrología se realizó con metrología convencional utilizando calibradores, profundímetros y micrómetros. La Metrología tomada en el rodete muestra que todas las dimensiones están dentro de lo solicitado por plano, a excepción de algunos puntos que se encuentran fuera del ajuste por máximo 0.02mm, lo cual se considera aceptable.

6.4.5. ENTREGABLES COMPROBACIÓN

Los entregables de la fase de comprobación constan de:

- Informe inspección visual: En la Figura 6.4.5.1. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos.

6. RESULTADOS

6.1 Resultados de la inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido realizado a el rodete Francis.

En las tablas a continuación, se presentan los resultados de inspección visual, líquidos penetrantes y partículas magnéticas fluorescentes encontrados en cada álabe, en donde se describe el tamaño y ubicación de las indicaciones de acuerdo con los Esquemas 1 y 2.

Resultados de inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido.

Figura 6.4.5.1. Sección de informe inspección visual.

- Informe END-Tintas penetrantes: En la Figura 6.4.5.2. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos.

ÁLABE	RESULTADOS DE INSPECCIÓN
ÁLABE 7	Sin indicaciones relevantes
	
Fotos 22 a 24. Imágenes alusivas al estado actual del Álab 7.	
ÁLABE	RESULTADOS DE INSPECCIÓN
ÁLABE 8	Sin indicaciones relevantes
	

Figura 6.4.5.2. Sección de informe END-PT.

- Informe END-partículas magnéticas: En la Figura 6.4.5.3. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos.

ANEXO FOTOGRÁFICO



Fotos 51 a 54. Fotos representativas de medición de parámetros de prueba.



Fotos 55 y 56. Fotos representativas de inspección mediante partículas magnéticas.

Figura 6.4.5.3. Sección de informe END-MT.

- Informe END-Ultrasonido: En la Figura 6.4.5.4. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos.



Fotos 57 y 58. Fotos representativas de inspección mediante líquidos penetrantes.



Fotos 59 y 60. Fotos representativas de inspección mediante ultrasonido.

Figura 6.4.5.4. Sección de informe END-UT.

- Informe END-Durezas: En la Figura 6.4.5.5. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos.

REGISTRO DUREZAS											
AREA INSPECCIONADA	Rodete : Zona Cara Superior (Acople)					VALOR MAYOR		348			
						VALOR MEDIO		322			
						VALOR MENOR		231			
ALABE #	MEDIDA I	MEDIDA II	MEDIDA III	MEDIDA IV	MEDIDA V	MEDIDA VI	MEDIDA VII	MEDIDA VIII	MEDIDA IX	MEDIDA X	
Alabe A1	235	302	325	323	338	348	314	310	328	321	
Alabe A3	231	274	336	331	318	311	340	317	314	324	
Alabe A5	248	304	322	310	327	334	332	337	342	344	
Alabe A7	288	297	308	315	341	325	317	321	327	310	
Alabe A9	301	312	333	319	315	329	334	341	340	324	
Alabe A11	271	316	322	337	344	326	314	326	330	331	
Alabe A13	246	284	304	325	322	319	316	317	324	322	
Nota: Todas las medidas en Brinell (HB)						Se presenta un diagrama de ubicación de mediciones , se tomaron 9 medidas equidistantes en 7 zonas de la cara acople , tomando de referencia el alabe A1.					
AREA INSPECCIONADA	Rodete : Zona Cara Superior (Acople)										





Figura 6.4.5.5. Sección de informe durezas.

- Informe de Metrología rodete: En la Figura 6.4.5.6. se presenta parte del informe realizado, el informe completo se presenta en anexos.

REGISTRO DE MEDICIÓN										
COTA No.	DIMENSIÓN	DIM. MÁX.	DIM. MÍN.	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MEDIDA 4	CONFORME	INSTRUMENTO	OBSERVACIONES
P3	ø 470	470,06	470	469,98	469,98	470	470,02	CONFORME	CAL-42	Metrología convencional.
P5	ø 849,5	849,59	849,5	849,59	849,6	849,58	849,59	CONFORME	CAL-42	Metrología convencional.
P6	ø 889,5	889,5	889,41	889,42	889,41	889,41	889,42	CONFORME	CAL-42	Metrología convencional.
P7	ø 932,5	932,59	932,5	932,5	932,48	932,51	932,5	CONFORME	CAL-42	Metrología convencional.
P8	ø 975,5	972,5	972,41	972,48	972,49	972,47	972,49	CONFORME	CAL-42	Metrología convencional.
P9	ø 1055	1055	1054,8	1054,95	1054,91	1054,93	1054,91	CONFORME	CAL-42	Metrología convencional.
P17	L 484	484,5	483,5	483,96	483,94	483,95	483,94	CONFORME	CAL-42	Metrología convencional.
P18	ø 1108	1108	1107,8	1108	1107,99	1108	1108	CONFORME	CAL-42	Metrología convencional.
P20	ø 911	911	910,94	910,94	910,93	910,94	910,93	CONFORME	CAL-42	Metrología convencional.
P21	ø 160	160,04	160	160,04	160,03	160,04	160,04	CONFORME	CAL-42	Metrología convencional.
P23	ø 60	60,06	60,03	60,03	60,04	60,03	60,02	CONFORME	CAL-42	Metrología convencional.

Figura 6.4.5.6. Sección de informe metrología.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

El proyecto “Procedimiento para la rehabilitación de un rodete Francis de una pequeña central hidroeléctrica de 15 MW” desarrolla un procedimiento para la rehabilitación de un rodete Francis perteneciente a una pequeña central hidroeléctrica de 15MW, integrando especificaciones técnicas como la CCH 70-4 a lo largo de la metodología del documento.

Durante la metodología del documento se definen los requerimientos de inspección del rodete por medio de la metrología, realizando inspección visual con previa limpieza acorde a la norma SSPC, toma de durezas para determinar si el rodete puede someterse a una intervención soldada y ensayos no destructivos con criterios de aceptación basados en las especificaciones técnicas de la CCH 70-4 clase 2 para el ensayo de tintas y nivel 2 para el ensayo de partículas magnéticas y ultrasonido. A partir de los requerimientos de la inspección se determinan los requerimientos para la reparación del rodete.

Dentro del capítulo de metodología, se especifica un procedimiento de reconstrucción de acuerdo con lo especificado en los requerimientos, identificando

los puntos críticos que son las zonas que no cumplen el criterio de aceptación para los END, cuantificando los desgastes y definiendo un método para la reconstrucción de geometrías complejas.

Adicionalmente se especifica la implementación de reconstrucción del rodete en el capítulo 5.3, donde se plantea que previo a cualquier intervención soldada no deben existir indicaciones relevantes en la superficie del material, se determinan procesos de soldadura y se especifica que tiene que existir un WPS, PQR y WPQ para poder realizar una correcta intervención por soldadura, se indica como se debe realizar la fabricación de las plantillas, que el mecanizado final debe cumplir con tolerancias de plano, se especifica la importancia de un alivio de tensiones después de la intervención soldada y la necesidad del pulido final y un balanceo dinámico.

Con el objetivo de verificar el procedimiento propuesto, se indica una etapa de inspección final, en la cual se realizan los ensayos no destructivos que deben cumplir con el criterio de aceptación de la especificación CCH 70-4 clase 2 para tintas penetrantes y nivel 2 para partículas magnéticas y ultrasonido, las metrologías que deben cumplir con tolerancias de plano, y las durezas se deben encontrar al rededor del rango de 280- 320HB, buscando validar que la reconstrucción del rodete se realizó con éxito.

Finalmente, se implementa toda la metodología propuesta en un caso particular, en el que se realiza una inspección inicial mediante metrología donde se identifican desgastes de hasta 3mm en diámetros exteriores y medidas fuera de tolerancias de plano, control de durezas que se encontraban en la zona del encastre un 8% por encima del rango y ensayos no destructivos que no cumplían con el criterio de aceptación en la CCH 70-4 clase 2 para tintas penetrantes, a partir de los cuales se especifica un procedimiento de reconstrucción, se implementa dicho procedimiento y se verifica obteniendo resultados que cumplen con los criterios de aceptación de la CCH 70-4 clase 1 en tintas penetrantes y nivel 1 en partículas magnéticas y ultrasonido. Las dimensiones finales del rodete se encuentran dentro de las tolerancias solicitadas en plano, con excepción de algunas medidas que se encuentran fuera de tolerancias por 0.02mm, lo que se considera aceptable y con una geometría simétrica en cada uno de los alabes verificada con las plantillas

fabricadas, adicionalmente a pesar de la intervención soldada se logra mejorar los valores de dureza en el rodete, obteniendo valores por encima del rango un 0.6% y se realiza un balanceo dinámico del rodete con los parámetros de trabajo del mismo para garantizar un correcto funcionamiento dinámico. Demostrando que el procedimiento propuesto en el capítulo de metodología funciona y es completamente aplicable en la reparación de rodetes de 15MW.

RECOMENDACIONES

Con base en el desarrollo del proyecto, la experiencia obtenida durante la inspección, reparación y verificación del rodete Francis, y considerando los resultados técnicos alcanzados, se formulan las siguientes recomendaciones orientadas a optimizar futuros procesos de rehabilitación de componentes hidráulicos en pequeñas centrales hidroeléctricas.

En primer lugar, se recomienda que todo proceso de rehabilitación inicie con una caracterización integral del componente, que incluya inspección visual, levantamiento dimensional y ensayos no destructivos aplicados en las zonas críticas del rodete, mismos elementos que permiten identificar el nivel real de deterioro y establecer la estrategia de reparación más adecuada.

La ausencia de un diagnóstico preciso incrementa el riesgo de reprocesos, fallas posteriores o pérdida de eficiencia hidráulica, en este sentido, resulta conveniente que las centrales hidroeléctricas mantengan registros históricos de inspección para cada rodete intervenido, de modo que la trazabilidad ayude a predecir patrones de desgaste y a planear mantenimientos preventivos.

En cuanto al proceso de reconstrucción geométrica, se recomienda el uso de herramientas de diseño asistido como Autodesk Inventor o software equivalente para modelar los álabes originales y definir plantillas de referencia, este paso es clave para garantizar la simetría y el perfil hidráulico correcto, especialmente en zonas donde la erosión o cavitación han producido pérdida significativa de material. La fabricación de plantillas metálicas ajustadas a la geometría original facilita el

mecanizado posterior y contribuye al control dimensional del rodete, siempre que sea posible, el mecanizado final debe realizarse en máquinas CNC, ya que permiten obtener tolerancias estrechas, superficies suaves y geometrías más precisas.

Desde el punto de vista de la soldadura, se recomienda ejecutar el proceso bajo procedimientos calificados (WPS y PQR), empleando soldadores certificados y consumibles compatibles con el material del rodete. La soldadura debe aplicarse por capas controladas, evitando sobrecalentamiento y tensiones residuales que puedan generar deformaciones. En los casos en que el material y la magnitud de la reparación lo ameriten, es aconsejable aplicar tratamiento térmico de alivio para reducir tensiones internas y mejorar el comportamiento del componente en operación. Este procedimiento incrementa la fiabilidad estructural y disminuye la probabilidad de agrietamientos futuros.

Una vez finalizado el proceso de soldadura y mecanizado, se recomienda realizar ensayos no destructivos completos, preferiblemente por una empresa externa que garantice imparcialidad y cumplimiento de criterios como los establecidos en la especificación CCH70-4. La inspección mediante líquidos penetrantes o partículas magnéticas permite detectar posibles discontinuidades superficiales generadas durante la reparación. En rodets con mayor nivel de criticidad o reparaciones profundas, puede considerarse la aplicación de ultrasonido para asegurar la integridad interna de las zonas intervenidas.

De manera complementaria, se recomienda incluir un balanceo dinámico del rodete antes de su instalación definitiva. Debido a que estos componentes operan a altas revoluciones, pequeños desbalances pueden generar vibraciones, pérdida de energía, desgaste acelerado o daños en el eje y rodamientos. El balanceo dinámico garantiza funcionamiento suave, menor carga mecánica y vida útil más larga para el conjunto turbina.

En relación con la operación de la central, se sugiere implementar un programa de mantenimiento preventivo basado en inspecciones periódicas, mediciones dimensionales y monitoreo de vibraciones y temperatura. Esto permite detectar tempranamente fenómenos de cavitación, erosión o deformación, evitando que el daño avance hasta etapas irreversibles. La adopción de prácticas de mantenimiento

preventivo resulta más económica y segura que las intervenciones reactivas, además de prolongar la eficiencia del rodete y la estabilidad de la generación eléctrica.

Finalmente, se recomienda considerar la rehabilitación de rodetes como una alternativa prioritaria frente a la fabricación de piezas nuevas, especialmente en PCH donde los períodos de parada impactan directamente la disponibilidad energética. La intervención local con capacidad industrial nacional reduce costos, plazos y dependencia de proveedores externos, favoreciendo la autonomía tecnológica del país. A nivel ambiental, la reparación disminuye el consumo de materias primas, reduce la generación de residuos y contribuye a la sostenibilidad de los sistemas hidroeléctricos.

En conclusión, se recomienda institucionalizar el procedimiento desarrollado en este proyecto como guía técnica para futuras rehabilitaciones, debido a que integra criterios normativos, inspección avanzada, reconstrucción geométrica y verificación con ensayos. Con su aplicación sistemática, las pequeñas centrales hidroeléctricas pueden aumentar la confiabilidad, eficiencia y vida útil de sus equipos, generando beneficios operativos, económicos y ambientales a corto y largo plazo.

8. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

[1] C. Correa, O. Araque, M. Palma, J. Martínez, and G. Rodriguez, “Boletín Estadístico 2018-2023S1 Minas y Energia,” UPME, 2024.

[2] Ingfocol Ltda. Potencial hidroenergético de Colombia, “HIDROENERGÍA Capítulo 1 ¿Qué es la Hidroenergía?”. Atlas. 2022

[3] R. Ciocoiu, R. Coman, O. Trante, A. Raiciu, M. Vasile, I. Ciucă et al., “Corrosion behavior of welded repaires for water turbine blades”, Revista De Chimie, vol. 70, no. 7, p. 2497-2501, 2019. <https://doi.org/10.37358/rc.19.7.7368>

[4] B. Xu, H. Li, W. Pang, D. Chen, Y. Tian, X. Lei et al., “Bayesian network approach to fault diagnosis of a hydroelectric generation system”, Energy Science & Engineering, vol. 7, no. 5, p. 1669-1677, 2019. <https://doi.org/10.1002/ese3.383>

- [5] A. Aguinaga, "The mechatronic approach in the mathematical modelling and simulation to control the water hammer in hydraulic facilities", 2023. <https://doi.org/10.11159/icmie23.101>
- [6] F. Ayancik, U. Aradag, E. Özkaya, K. Çelebioğlu, Ö. Ünver, & S. Aradağ, "Hydroturbine runner design and manufacturing", *International Journal of Materials Mechanics and Manufacturing*, p. 162-165, 2013. <https://doi.org/10.7763/ijmmm.2013.v1.35>
- [7] M. Ylönen, P. Saarenrinne, J. Miettinen, J. Franc, M. Fivel, & T. Nyysönen, "Cavitation erosion resistance assessment and comparison of three francis turbine runner materials", *Materials Performance and Characterization*, vol. 7, no. 5, p. 20180015, 2018. <https://doi.org/10.1520/mpc20180015>
- [8] R. Adhikari, J. Vaz, & D. Wood, "Cavitation inception in crossflow hydro turbines", *Energies*, vol. 9, no. 4, p. 237, 2016. <https://doi.org/10.3390/en9040237>
- [9] H. Wang, "Research on the influence of solid volume fractions on turbine performance", *International Journal of Heat and Technology*, vol. 34, no. 4, p. 630-636, 2016. <https://doi.org/10.18280/ijht.340412>
- [10] M. Jabłońska, W. Jurczak, D. Ozimina, & M. Adamiak, "Increasing the operational reliability of a ship by using a composite impeller in the event of hydrophore pump failure", *Eksploracja I Niezawodnosc - Maintenance and Reliability*, 2023. <https://doi.org/10.17531/ein.2023.1.18>
- [11] T. HUYNH, T. TRẦN, & Q. PHẠM, "The investigation of the dynamic characteristics of turbine impeller disc of gas turbine engine using ansys software", *Science & Technology Development Journal - Engineering and Technology*, vol. 3, no. SI3, p. first, 2021. <https://doi.org/10.32508/stdjet.v3isi3.639>
- [12] C. Wu, B. Vaisman, & K. McCusker, "Cfd analyses of hpt blade air delivery system with and without impellers", 2011. <https://doi.org/10.1115/gt2011-45949>

- [13] A. Netrusov and B. Фомин, "Composite materials for impellers of the turbocharger of automotive engines", *Traktory I Sel Hozmashiny*, vol. 84, no. 8, p. 28-36, 2017. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66328>
- [14] M. Cave and M. Ji, "Impeller manufacturing: design for machining", 2017. <https://doi.org/10.1115/gt2017-64724>
- [15] T. Wyrobnik, S. Oh, A. Ducci, & M. Micheletti, "Engineering characterization of the novel bach impeller for bioprocessing applications requiring low power inputs", *Chemical Engineering Science*, vol. 252, p. 117263, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117263>
- [16] F. Lou, J. Fabian, & N. Key, "A new approach for centrifugal impeller preliminary design and aerothermal analysis", *Journal of Turbomachinery*, vol. 140, no. 5, 2018. <https://doi.org/10.1115/1.4038876>
- [17] Alani, A. M., Tosti, F., Ciampoli, L. B., Gagliardi, V., & Benedetto, A., "An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies," *NDT & E International*, vol. 115, p. 102288, Oct. 2020.
- [18] Steel Castings for Hydraulic Machines: Specification for Inspection of Steel Castings for Hydraulic Machines, Version 4, Study Group CCH 70-4, TVFA HYDRO TPA KKS, Vienna, Austria, Oct. 2014.
- [19] B. Wang, et al., "Analysis of residual stress relief for Ti62A alloy welded joints by post weld heat treatment considering creep effect," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 40, pp. 334-350, May 2023
- [20] L. Li et al., "Review of Rotor Balancing Methods," *Machines*, 2021
- [21] L. Cuenca-Navarrete, M. Naranjo-Mantilla, & J. Buele, "Estandarización de procesos prioritarios en la recuperación del rodete de una turbina tipo Francis", *Cienciamérica*, vol. 10, no. 3, p. 90-105, 2021. <https://doi.org/10.33210/ca.v10i3.373>

[22] J. Almirón, H. Anchapuri, J. Mamani-Quispe, R. Churata, D. Tupayachy-Quispe, & J. Torres-Almirón, "Study of the improvement of mechanical properties in a low carbon steel ASTM 615a grade 60 due to the formation of tempered martensite", Proceedings of the 21th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2023): "Leaders, 2023. <https://doi.org/10.18687/laccei2023.1.1.1195>

[23] J. Galeano, H. León-Henao, J. Giraldo, & A. Toro, "Desarrollo de un procedimiento para réplicas metalográficas en campo de rodets hidráulicos de acero inoxidable CA6NM", Revista Uis Ingenierías, vol. 24, no. 1, 2025. <https://doi.org/10.18273/revuin.v24n1-2025001>

9. ANEXOS

- Plano del rodete: "RODETE LMS_OT-11535_01092023"
- Informe inspección visual, END-PT, MT y UT iniciales: "RODETE-99-ENGICAST-2024"
- Informe durezas iniciales: "REGISTRO DUREZA RODETE FRANCIS SAN MATIAS E4 – RECEPCION"
- Informe de metrología inicial: ENG-MRH-FR-003 - INICIAL - RODETE SMT E4"
- Informe mapeo de defectos: "Mapeo de defectos- Rodete francis SMT E4 – recepción"
- Informe diagnostico inicial: "ENG-MRH-FR-010 - INFORME DIAGNÓSTICO INICIAL SMT E4"
- Informe saneado del rodete (preparación superficial): "END_PT Rodete francis PCH SMT E4 - Después saneado"
- WPS: "ENG-041 – WPS"
- PQR: "ENG-041 – WPQ"
- WPQ: "ENG-041 – PQR"
- Informe alivio térmico: "INF Alivio de tensiones Juego de anillos, rodete francis y álabes"
- Informe balanceo dinámico: "Protocolo Balanceo Rueda Francys"
- Informe inspección visual, EDN-PT,MT,UT liberación: "END LIBERACIÓN RODETE FRANCIS" REGISTRO DUREZA RODETE FRANCIS SMT E4 – LIBERACION"

- Informe metrología de liberación: “ENG-MRH-FR-003-METROLOGIA DE LIBERACIÓN RODETE”