



Evaluación del desempeño de recubrimientos cerámicos para mejorar la resistencia al desgaste de turbinas tipo Pelton, usadas en centrales a filo de agua

Jorge Armando Bolívar Correa

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Medellín, Colombia
2020

Evaluación del desempeño de recubrimientos cerámicos para mejorar la resistencia al desgaste de turbinas tipo Pelton, usadas en centrales a filo de agua

Jorge Armando Bolívar Correa.

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero electromecánico

Director (a):
Sc.D. Elkin Gutiérrez

Línea de Investigación:
Materiales

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Medellín, Colombia
2020

A mis padres, A mi esposa, compañeros de trabajo e ISAGEN.

Agradecimientos

Para la realización de este proyecto, tuve la fortuna de contar con grandes compañeros de trabajo, los cuales unidos bajo el mismo objetivo prestamos nuestra fuerza de trabajo logrando mostrar en diferentes espacios empresariales, los resultados obtenidos. Agradezco de igual forma a ISAGEN E.S.P S.A. por permitirme utilizar información empresarial para mostrarla como mi proyecto de grado, para obtener mi título como Ing. Electromecánico. A mis docentes por su ayuda y compromiso en la enseñanza diaria.

Resumen

Las centrales hidroeléctricas a filo de agua, no tiene la capacidad de almacenar energía, por ende, deben generar la energía disponible, según el caudal que disponga en ese momento. Este tipo de centrales, se deben proyectar en sus diseños iniciales con un complejo de obras civiles, que ayuden a decantar el sedimento que contiene el agua que ingresa a la turbina, con el fin de evitar daños prematuros en el rodete.

El estado de los cangilones de una turbina Pelton de una central hidroeléctrica a filo de agua, depende en gran parte de la eficiencia de los módulos desarenadores. En algunos casos el rio trae gran cantidad de sedimentación, ocasionando que estos se colmaten fácilmente provocando el aumento del material particulado que va en el agua que ingresa a la turbina generando abrasión, erosión, cavitación, pérdida del perfil hidráulico del cangilón, daños en la geometría del cangilón y por ende pérdida de eficiencia en la generación de energía, aumentando los costos asociados al mantenimiento de la planta. Para controlar los efectos adversos de la abrasión, se tiene varios caminos, mitigar las irregularidades del perfil hidráulico por medio de alisados hasta llegar al máximo permitido de desgaste en el ancho del cangilón; enviarlo a reparar por aporte de soldadura e intentar recuperar el perfil original por medio de máquinas rotativas o aplicar desde el inicio de entrada a operación de la central un recubrimiento cerámico, el cual ayudará a contrastar los daños que puedan estar causando los sólidos suspendidos en el agua.

En este documento se evaluó la aplicación de un recubrimiento cerámico a base de carburo de tungsteno en los cangilones de una turbina Pelton, el cual fue aplicado 5 años después de que la central hidroeléctrica entrara en operación comercial. De igual forma se logró realizar un resumen técnico del desgaste del rodete, el espacio de tiempo donde se decidió realizar la caracterización de los sólidos suspendidos en el agua que ingresaban al rodete y porque se estaba presentando un desgaste prematuro en la turbina Pelton. Los resultados finales nos mostraron que el agua contenía un alto

porcentaje de minerales con durezas superiores de 7.0 Mohs como lo es el cuarzo, los perfiles de estos minerales eran agudos y llenos de aristas que combinados con la velocidad que ingresaban al rodete se convertían en focos de atención que ocasionaban el desgaste. Después de la aplicación del recubrimiento cerámico la ganancia porcentual en la eficiencia de generación de energía obtenida y sostenida en el tiempo fue aproximadamente de 2,5%, motivo por el cual la tasa de retorno de la inversión se dio en casi 9.5 meses, de igual manera se mejoró la disponibilidad de la central hidroeléctrica en aproximadamente 120 horas por año, esto al no desmontaje del rodete por el daños del perfil hidráulico y reparaciones por soldadura.

Palabras clave: Central hidroeléctrica, recubrimientos cerámicos, materiales.

Abstract

Hydroelectric plants on the edge of water do not have the capacity to store energy; therefore, they must generate the available energy, according to the flow available at that time. This type of power station must be projected in its initial designs with a complex of civil works, which help to decant the water that enters the turbine, in order to avoid premature damage to the impeller.

In some cases, the particulate material is not of a high specific weight, which is why they remain suspended in the water and enter the turbine, generating abrasion due to erosion, cavitation, loss of the hydraulic profile of the bucket, geometry and therefore loss of efficiency in power generation.

For this reason, the costs associated with maintenance are affected. To control the adverse effects of abrasion, there are several ways, mitigating the irregularities of the profile by means of smoothing, until reaching the maximum allowable wear in the width of the bucket; send it to repair by welding and try to recover the original profile by means of rotary machines or apply a ceramic coating from the first start of operation of the plant, which will help to contrast the damages that the suspended solids may be causing in Water.

In this case, we are going to show the evaluation of a ceramic coating based on tungsten carbide, which was applied 5 years after the plant went into commercial operation, achieving evidence of the entire history prior to wear of the impeller, the moment where carried out the characterization of the waters, to identify what type of solids the water contained, the result of which was that it contained in a high percentage of a mineral with a hardness of 7.0 Mohs, and a profile full of edges such as quartz. The percentage gain in efficiency obtained and sustained over time was approximately 2.5%, where the rate of return on investment occurred in almost 9.5 months and the increase in availability of 120 hours per year, due to the non-dismantling of the impeller due to damage to the hydraulic profile.

Keywords: Hydroelectric power station, ceramic coatings, materials.

Contenido

1.	Introducción.....	1
2.	Objetivos	5
2.1	Objetivo General.....	5
2.2	Objetivos Específicos	5
3.	Pregunta de investigación y justificación	6
3.1	Pregunta de investigación	6
3.2	Justificación del estudio.....	6
4.	Marco de Referencia	9
4.1	Marco de antecedentes	9
4.1.1	Antecedentes de solución de problemas de desgaste en turbinas tipo Pelton	9
4.1.2	Estado del arte en recubrimientos cerámicos para aplicaciones de desgaste.....	11
4.2	Marco teórico-conceptual	16
4.2.1	Centrales hidroeléctricas.	16
4.2.2	Turbinas.....	19
4.2.3	Desgaste en turbinas.....	25
4.2.4	Mantenimiento preventivo en turbinas tipo Pelton.	28
5.	Diseño Metodológico.....	31
5.1	Evaluación del tipo de sólidos suspendidos que contiene el agua del Rio Amoyá.	31
5.2	Comparación del grado de desgaste entre el rodete anterior y el rodete con recubrimiento.....	37
5.3	Determinación del comportamiento del recubrimiento cerámico a base de carburo de tungsteno en la protección de los cangilones del rodete Pelton.....	43
5.4	Beneficios de la aplicación del recubrimiento cerámico.	44
6.	Resultados y discusión.....	45
6.1	Resultados de la caracterización y evaluación de los sólidos que contienen el agua del Rio Amoyá.....	45
6.2	Evaluación y seguimiento al deterioro presentado en el rodete con recubrimiento cerámico.....	51
6.2.1	Inspección por medio de ensayos no destructivos en el periodo t_0 (500 horas de operación)	54
6.2.2	Prueba realizada en el periodo T1 (a las 1500 horas).....	59
6.2.3	Prueba de inspección T_2 (a las 4000 horas).....	60

6.2.4	Prueba de inspección T3	62
6.2.5	Inspección T0 rodete sin recubrimiento.	64
6.2.6	Resultados prueba T1 1500 horas de operación.	65
6.2.7	Resultados prueba T2 (4000 horas de operación).....	68
6.2.8	Resultados prueba T3 (8000 horas de operación).....	70
6.3	Análisis del desgaste ocurrido en el rodete sin recubrimiento vs el rodete con aplicación de recubrimiento a base de carburo de tungsteno.	72
6.3.1	Primera comparación realizada a las 2000h.....	72
6.3.2	Inspección realizada en el periodo T ₂ (a las 4000 horas de operación).....	74
6.4	Valoración de la mejora de eficiencia con la instalación del rodete con recubrimiento...77	
6.5	Evaluación de costo-beneficio de la aplicación del recubrimiento cerámico.....	80
7.	Conclusiones y recomendaciones	83
7.1	Conclusiones	83
7.2	Recomendaciones	85
8.	Bibliografía.....	87
Anexo A:	Mediciones en cangilones de inspección T ₀	90
Anexo B:	Registro fotográfico y mediciones en cangilones de inspección T ₁	92
Anexo C	Registro fotográfico y mediciones en cangilones de inspección T ₂	95
Anexo D.	Registro fotográfico y mediciones en cangilones de inspección T ₃	101
Anexo E.	Plantillas utilizadas para medir el espesor del recubrimiento del cangilón.....	108

Lista de figuras

Figura 1 .Aplicación recubrimiento a una turbina a gas.....	10
Figura 2. Cambio en la estructura por sinterización.	11
Figura 3. Clasificación de las tecnologías de proyección térmica según el rango de temperatura y velocidad de las partículas.	12
Figura 4. Estructura de la proyección térmica.	14
Figura 5. Micrografía de un recubrimiento de aluminio sobre un acero.....	14
Figura 6. Estructura de control de HVOF.	15
Figura 7. Pistola de aplicación de HVOF.....	15
Figura 8. Central hidroeléctrica con embalse.	17
Figura 9. Diferencia entre una central con embalse y filo de agua.	17
Figura 10. Central de bombeo.....	18
Figura 11. Turbinas de acción.....	19
Figura 12. Turbina de reacción.	20
Figura 13. Tipo aprovechamiento de las turbinas.	21
Figura 14. Partes del inyector.	22
Figura 15. Partes de cangilón.	23
Figura 16. Cámara de descarga.....	24
Figura 17. Tipos de desgaste en un cangilón.	27
Figura 18. Técnica de reparación.....	27
Figura 19. DRX con identificación de fases.....	32
Figura 20. Muestra por lupa binocular.....	33
Figura 21. Mapeo SEM y química de la muestra.....	34
Figura 22. Química y morfología de las principales fases presentes en la muestra.....	35
Figura 23. Mecanismo de erosión en los cangilones de una turbina Pelton.....	36
Figura 24. Esquema partes del cangilón de una turbina Pelton.	39
Figura 25. Plantillado cangilón.	42
Figura 26. Desgaste rodete de origen a las 10.000 horas.....	45
Figura 27. Distribución tamaño de partículas por DRX.	48
Figura 28. Cono Imhoff.....	50

Figura 29. Muestra de ingreso de sólidos de la estación de medición orilla durante diferentes crecientes del río.....	50
Figura 30. Cangilón 4 con falta de revestimiento intradós superior.	55
Figura 31. Cangilón 5 con falta de revestimiento en el pico.....	55
Figura 32. Cangilón 10 con falta de revestimiento en el pico.....	56
Figura 33. Cangilón 11 con falta de revestimiento en el pico y en los bordes de las escotaduras. 56	
Figura 34. Pico pulido en cangilón 10 y en borde de escotadura cangilón 4.	57
Figura 35. Inspección con partículas magnéticas en raíz y boquereles.....	57
Figura 36. Medición de revestimientos en rodete y agujas.....	58
Figura 37. Desgaste Arista media 4000 horas servicio.....	69
Figura 38. Promedio de la medición del desgaste en dos cangilones en la zona del borde y los intradoses.	73
Figura 39. Registro plantillado.	73
Figura 40. Promedio del desgaste en dos cangilones en el borde y los intradoses.....	74
Figura 41. Desgaste avanzado en cangilones.	75
Figura 42. Desgaste de la arista.	76
Figura 43. Desgaste del revestimiento.....	77
Figura 44. Eficiencia comparativa rodete con recubrimiento.....	78
Figura 45. Comparación de potencia rodete Voith vs. Andritz.	79
Figura 46. Falta de recubrimiento en el cangilón 5.	92
Figura 47. Falta recubrimiento cangilon 11.....	92
Figura 48. Falta recubrimiento cangilon 7.....	92
Figura 49. Falta de recubrimiento en el pico de los cangilones 10 y 11.....	93
Figura 50. Falta de recubrimiento en el cangilón 1.	95
Figura 51. Falta de recubrimiento en el cangilón 2.	95
Figura 52. Falta de recubrimiento en el cangilón 3.	95
Figura 53. Falta de recubrimiento en el cangilón 5.	96
Figura 54. Falta de recubrimiento en el cangilón 5.	96
Figura 55. Falta de recubrimiento en el cangilón 7.	97
Figura 56. Falta de recubrimiento y desgaste en la escotadura en el cangilón 9.....	97
Figura 57. Falta de recubrimiento y desgaste en escotadura superior de cangilón 11.....	98
Figura 58. Falta recubrimiento cangilon 2 y 3.	101
Figura 59. Falta recubrimiento cangilon 4 y 5.	102
Figura 60. Falta de recubrimiento cangilon 6 y 7.	103
Figura 61. Falta de recubrimiento cangilon 9,10 y 11.	104
Figura 62. Falta de recubrimiento cangilon 12, 13 y 14.	105
Figura 63. Plantillas Q2,Q3,Q4 utilizadas para medir la pérdida del perfil de cangilon.....	108

Figura 64. Plantillas para medir la pérdida de material en el cangilon. 109

Lista de tablas.

Tabla 1. Tipos de recubrimiento y sus aplicaciones.-----	13
Tabla 2. Programa de mantenimiento de una turbina. -----	29
Tabla 3. Intervalos de inspección al rodete con <i>revestimiento</i> . -----	41
Tabla 4. Mediciones en los cangilones.-----	54
Tabla5.-----	59
Tabla 6. Resultados de la inspección en el periodo T2 -----	60
Tabla 7. Resultados de la inspección en el periodo T2 parte 2. -----	61
Los resultados para este periodo se muestran en las Tablas 8 y 9; y el desgaste de la cerámica en cada cangilón en las Tablas 38-40 (Ver Anexo D).Tabla 8.-----	62
Tabla 9. Inspección a tiempo T3 parte 2.-----	63
Tabla 10. Inspección a tiempo T0 parte 1. -----	64
Tabla 11. Inspección a tiempo T0 parte 2. -----	65
Tabla 12. Inspección a tiempo T1 cangilón 5. -----	66
Tabla 13. Inspección a tiempo T1 cangilón 15. -----	66
Tabla 14. Inspección a tiempo T1 cangilón 5.-----	67
Tabla 15. Inspección a tiempo T1 cangilón 15. -----	67
Tabla 16. Inspección a tiempo T2 cangilón 5.-----	68
Tabla 17. Inspección a tiempo T2 cangilón 15. -----	68
Tabla 18. Inspección a tiempo T2 cangilón 5.-----	69
Tabla 19. Inspección a tiempo T2 cangilón 15. -----	69
Tabla 20. Inspección a tiempo T3 cangilón 5.-----	70
Tabla 21. Inspección a tiempo T3 cangilón 15. -----	70
Tabla 22. Inspección a tiempo T3 cangilón 5.-----	71
Tabla 23. Inspección a tiempo T3 cangilón 15. -----	71
Tabla 24: Costos de la operación y mantenimiento de un rodete sin recubrimiento. -----	81
Tabla 25: Costos operación y mantenimiento de un rodete con recubrimiento.-----	81
Tabla 26. Cangilón 4 medidas en micras.-----	90
Tabla 27. Cangilón 7 medidas en micras. -----	90
Tabla 28. Cangilón 11 medidas en micras. -----	91
Tabla 29. Cangilón 17 medidas en micras. -----	91
Tabla 30. Cangilón 4 medidas en micras.-----	93
Tabla 31. Cangilón 7 medidas en micras.-----	93
Tabla 32. Cangilón 11 medidas en micras. -----	94
Tabla 33. Cangilón 17 medidas en micras. -----	94
Tabla 34. Cangilón 4 medidas en micras.-----	98
Tabla 35. Cangilón 7 medidas en micras.-----	98
Tabla 36. Cangilón 11 medidas en micras. -----	100
Tabla 37. Cangilón 17 medidas en micras. -----	100
Tabla 38. Cangilón 7 medidas en micras.-----	106
Tabla 39. Cangilón 11 medidas en micras. -----	106
Tabla 40. Cangilón 17 medidas en micras. -----	107

1. Introducción

En la esfera económica de la generación de energía, uno de los activos más costosos son las turbinas. Allí es donde todos los tipos de energía que se encuentran en este proceso sufren transformaciones significativas, principalmente la energía cinética del agua la cual se convierte en energía mecánica, proporcionándole a la turbina una cantidad de trabajo considerable. Adicionalmente el agua de algunas cuencas contiene toneladas de sólidos suspendidos (cuarzo, granito, arena etc.), que, en combinación con la energía acumulada del agua, pueden llegar a causar daños muy graves a la turbina. Esto conlleva a la disminución de la vida del rodete y por ende de su eficiencia.

En la producción de energía por medio del agua “Hidroelectricidad”, se presentan muchos gastos en reparaciones de los rodetes por soldadura, tiempos muertos, pérdida de eficiencia de las unidades de generación, daños excesivos por abrasión y cavitación y todo esto debido a la calidad del agua en algunas cuencas. Dentro de la industria en general se viene incursionando en el campo de los recubrimientos “*Coatings*” cerámicos carburo de tungsteno, carburo de titanio, entre otros), que son materiales resistentes al desgaste. Estas nuevas tecnologías llevan a aumentar el número de horas de trabajo de los rodetes y los períodos de mantenimiento preventivo y correctivo; así como a disminuir las intervenciones, entre otros beneficios.

ISAGEN S.A. es una organización de inversionistas privados, que tiene su sede principal en la ciudad de Medellín. Es la tercera generadora del país, con una capacidad instalada de 3,032 GW, distribuidos en 6 centrales hidroeléctricas y una térmica. La demanda de energía eléctrica de Colombia en el 2016 fue de 75,230 GWh, de los cuales ISAGEN S.A. generó el 15% (11,284 GWh), lo que representa un rubro importante para el crecimiento económico del país.

La gran mayoría de industrias depende totalmente de la energía eléctrica. Haciendo un poco de memoria, en el apagón del 2007 Colombia llegó a perder casi 3000 millones de pesos, lo que indica que un gran porcentaje del PIB depende exclusivamente de la generación de energía eléctrica, aunque somos uno de los países de Latinoamérica, después de Bolivia, que menos consume energía, con un promedio per cápita de 1,153 kWh, mientras que Chile es el que más consume con 3.875 kWh per cápita. Esto indica

que falta más desarrollo y saber aprovechar todo ese potencial hidroeléctrico con que cuenta el país.

Las turbinas Pelton tienen la característica importante de aprovechar toda la energía cinética del fluido, que es dirigido a la rueda por medio de un “chorro”. Estas turbinas son utilizadas en diseños donde se cuenta con una gran altura de presión, H , y poco caudal Q . El material con que se fabrican estas ruedas es un acero inoxidable martensítico y debe resistir a la fatiga, erosión y corrosión. Si las condiciones de trabajo son un poco más exigentes, deben agregarse otros materiales a la aleación de acero, como son el níquel y el molibdeno. En algunos casos, se pueden encontrar aceros al 13% de cromo y aceros austeníticos que presentan una excelente capacidad al desgaste.

El proceso de fabricación es un factor importante en la vida del rodete. En la industria en general se aplican varios procesos de fabricación, siendo el más común, la fundición. Este proceso de fabricación en ciertas ocasiones puede presentar defectos, como lo son los poros, estos poros pueden llegar a disminuir la vida promedio del rodete, la cual puede estar oscilando en alrededor de 80.000 horas de servicio, dependiendo de las condiciones y tipo de fluido donde va ser instalado. Se han conocido rodetes que aproximadamente a las 4000 horas de servicio, ya están presentando un desgaste considerable en los cangilones.

El desgaste es un proceso normal del rodete por sus condiciones de operación. No obstante, un desgaste prematuro en los cangilones es un indicio de la necesidad de hacer un seguimiento más profundo de las condiciones de trabajo del rodete (calidad del agua); la periodicidad de las inspecciones aumenta y puede ser necesario el cambio prematuro del rodete. Este cambio incluye la planificación de la mano de obra, materiales, repuestos, costos por no generación, etc. Los costos totales asociados al cambio de un rodete pueden estar cerca de los \$ 100.000.000, los cuales significan un sobre costo respecto al programa inicial de mantenimiento. Si el desgaste llegara a presentar un estado avanzado, ya se podría estar pensando en la reconstrucción por soldadura, lo que sería otro rubro importante para la economía de la empresa.

Asociado al desgaste acelerado de los cangilones, pueden venir otros problemas que hacen referencia a la pérdida de eficiencia de la máquina. Se entiende con esto que, con la misma cantidad de agua, ya no se podrá generar la misma energía. Se atribuye esto a

varios factores como lo es la pérdida del perfil hidráulico de los cangilones, distorsión del chorro, etc. Para la empresa, esto deriva en una disminución de los ingresos por generación, y el no aprovechamiento al máximo del recurso hidráulico.

La eficiencia de un rodete por diseño, puede estar sobre el valor del 92% a máxima carga. Un rodete a máxima carga implica que se está consumiendo todo el caudal y se está generando toda la energía disponible de la máquina. En el caso particular de la Central Hidroeléctrica Amoyá, existen dos unidades de generación. Para resaltar la importancia de la eficiencia energética, considérese la Unidad 1 (U1). En plena carga, dicha unidad genera 40 MWh, con un porcentaje de apertura de los inyectores al 85% (apertura máxima 93%). Suponiendo que el costo del kWh son 120 pesos, la empresa estaría ganando por día 11.520.000 pesos, y eso que aún se cuenta con un 8% de apertura de los inyectores. La pérdida de eficiencia se comenzaría a notar cuando para generar los mismos 40mwh ya no se requiera de una apertura de los inyectores del 85% si no de un 88%, lo que significaría que se está gastando más agua para generar la misma potencia.

Para controlar el desgaste acelerado de los cangilones del rodete se vienen introduciendo tecnologías de recubrimiento cerámico "*Coating*" a nivel mundial. Existen varias técnicas de aplicación del recubrimiento, una de ellas es la aplicación de una capa de carburo de tungsteno por medio de la técnica HVOF (High Velocity Oil Fuel) con la cual se alcanzan espesores entre 200µm y 500µm. Esta tecnología no es muy popular en nuestro país para la aplicación sobre las piezas que están sometidas a desgaste abrasivo, cavitación o erosión en la generación de energía eléctrica.

Considerando los efectos negativos del desgaste en los cangilones, este proyecto se orientó en la evaluación de recubrimientos cerámicos en turbinas tipo Pelton usadas en las centrales de generación de energía a filo de agua. Como primer paso, se estudiaron posibles tipos de recubrimientos cerámicos y tecnologías de aplicación de los mismos, enfocándose en sus aplicaciones en el proceso de generación de energía eléctrica. Con base en procedimientos de selección de materiales, se concretó cuál recubrimiento y proceso de aplicación fueron los óptimos para nuestro caso. Posteriormente, el recubrimiento seleccionado fue implementado en todas las turbinas de la Central hidroeléctrica del río Amoyá, y su desempeño fue evaluado a largo plazo con base en la reducción del desgaste de los cangilones. Con el recubrimiento seleccionado se aumentó

la vida útil del rodete y sus componentes, manteniendo la eficiencia y productividad de la Central hidroeléctrica por un tiempo más prolongado. De esta forma, se eliminaron los costos de reparaciones por soldadura, lo que aumento la disponibilidad de las unidades de generación y por ende su producción.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño del recubrimiento a base carburo de tungsteno al ser aplicado en un rodete de turbina Pelton en una central tipo filo de agua.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el tipo de sólidos suspendidos que contiene el agua a turbinar del río Amoyá, con base en pruebas de laboratorio previamente realizadas.
- Relacionar el grado de deterioro de un rodete Pelton con recubrimiento en comparación con uno sin recubrimiento.
- Valorar la eficiencia del recubrimiento aplicado y su costo beneficio.

3. Pregunta de investigación y justificación

3.1 Pregunta de investigación

Desde el punto de vista técnico y económico, ¿Vale la pena implementar un recubrimiento a base de carburo de tungsteno para reducir el desgaste acelerado en turbinas tipo Pelton, que trabajan en centrales a filo de agua?

3.2 Justificación del estudio

ISAGEN S.A. es una empresa que se caracteriza por su ética de trabajo, la cual busca expandir en los sectores donde se encuentra las áreas de influencia de las centrales y proyectos de generación. El bienestar producido por la empresa en las áreas de influencia se traduce en fuentes de empleo y el pago correcto de las regalías que se establecen por Ley.

Además de esto, tiene implementado un plan socio-económico y ambiental, del cual se benefician todas las personas del área urbana y rural. Las regalías son un porcentaje definido de la producción total de energía, que deben entregarse al propietario de la zona de influencia, o el municipio. Teniendo una perspectiva diferente, podemos identificar que casi todos los municipios donde tiene influencia ISAGEN S.A. han sido golpeados por la violencia, y su desarrollo se ha visto limitado por diversas razones. Los dineros de las regalías por generación de energía son invertidos en desarrollo social y de infraestructura para la comunidad, razón por la cual son tan importantes para los municipios.

Haciendo énfasis en la Central hidroeléctrica del Rio Amoyá, la cual es el objeto de estudio de este proyecto, es importante mencionar que ésta representa varios beneficios para la comunidad en general del municipio de Chaparral, Tolima, que es donde está ubicada la central. Estos beneficios se acrecientan cuando la central opera a plena capacidad de generación.

En este caso, el municipio va contar siempre con el servicio de energía para sus pobladores y empresas, lo cual se convierte en generación de empleo y calidad de vida.

Además, una generación continua de energía, sin paros no programados, se traduce en mayores regalías para el municipio.

Al presentarse una falla por desgaste en el rodete, la central tendría que parar para su mantenimiento y su disponibilidad de generación bajaría. En estas circunstancias, el sistema de Transmisión Regional (STR) tendría que surtir al municipio con la energía generada por otras centrales del sector, lo que genera sobrecostos por transmisión y pérdidas económicas al municipio. Además, el tiempo cesante de producción de energía deriva en menores regalías.

Teniendo en cuenta lo anterior, la reducción de las reconstrucciones tempranas por soldadura en los rodetes, lo cual se logrará con la aplicación del recubrimiento cerámico, no sólo significará un ahorro considerable para la organización, el aumento de la disponibilidad, eficiencia energética y el retorno creciente de la inversión a corto y largo plazo, sino que también implicará beneficios importantes para las zonas de influencia.

Además, las nuevas tecnologías en el desarrollo de los recubrimientos son un campo muy innovador para la comunidad que se encuentra laborando en la central hidroeléctrica del río Amoyá; esto generará una gran apropiación y empoderamiento del conocimiento en un municipio tan escaso de profesionales en la industria de la generación eléctrica.

En la industria de la generación de energía hidroeléctrica se viene incursionando en las centrales a filo de agua. Básicamente, estas centrales son aquellas que no requieren de un embalse para almacenar energía potencial, sino que por el contrario aprovechan todo el caudal que contiene el afluente en ese momento. Una de las principales características de las centrales a filo de agua es que no generan un impacto tan grande en las zonas boscosas, debido a que no se tienen que inundar predios para la construcción del embalse; de igual manera, este tipo de centrales son consideradas como centrales de generación limpia, por la no generación de CO₂. Una desventaja, es que como este tipo de centrales depende en su totalidad de un afluente, en temporadas de verano no podrían generar a su capacidad instalada por la falta de caudal. Como el presente proyecto está enfocado en la disminución del desgaste en las turbinas usadas en dichas centrales, que es uno de los problemas más frecuentes debido a la cantidad de sólidos suspendidos que contiene el agua de los afluentes, los resultados obtenidos podrían

incentivar la apropiación de este tipo de centrales en nuestro país, con los beneficios ambientales derivados de ello.

4. Marco de Referencia

4.1 Marco de antecedentes

4.1.1 Antecedentes de solución de problemas de desgaste en turbinas tipo Pelton

En la industria de la hidroelectricidad se viene trabajando en el recubrimiento de partes importantes de las turbinas, como las agujas de los inyectores de las turbinas Pelton, las tapas de la turbina Francis, roto válvulas etc.; por medio de carburo de tungsteno. Algunas empresas que han implementado recubrimientos cerámicos en la industria de la hidroelectricidad se encuentran en Perú, Chile y Colombia. La empresa de generación Chivor realizó el recubrimiento de las agujas y boquereles de sus turbinas, aumentando la vida útil de estos elementos en los cuales fue aplicado un recubrimiento cerámico por plasma. Igualmente, la tecnología de recubrimientos es importante en la generación de energía por medio de gas y en la industria aeronáutica, donde las partes son construidas con sustratos altamente resistentes a elevadas temperaturas. En estas industrias, en las décadas de 1950-60, se hizo evidente que algunos de los componentes de los sustratos (cobalto y níquel) no eran compatibles con composiciones que aumentaban la resistencia mecánica, y otras que ofrecían óptima protección contra ambientes agresivos.

Esto generó desgaste avanzado en los materiales, llevando a este tipo de industrias a buscar opciones de recubrimientos que trabajaran a elevadas temperaturas (metálicos, cerámicos, etc.) por lo tanto, se seleccionaron recubrimientos a base de aluminuros con aleaciones de níquel. De igual manera, se están recubriendo los álabes de las turbinas con TBC (recubrimientos de barrera térmica) (Ver figura 1). Otra técnica para producir aluminuros es la aplicación de lodos, que es AL-SI en polvo con un aglutinante, que se aplica por medio de rociado o mediante brocha como una pintura normal; estos recubrimientos han venido aumentando la capacidad de resistencia del sustrato a las altas temperaturas que se manejan con este tipo de turbinas (1600°C) (Agüero, 2007)



Figura 1 .Aplicación recubrimiento a una turbina a gas. Fuente: (SULZER, 2016)

En algunas empresas, la solución al problema del desgaste en las turbinas no sólo se ha enfocado en la aplicación de recubrimientos, sino también en la reducción de la sedimentación que trae el agua de los ríos. Reduciendo la velocidad del agua con instalación de pilares de contención, se reduce la turbulencia del agua y mejora la eficiencia de los módulos desarenadores. Un ejemplo representativo de una solución que combina la intervención en la fuente de energía (el agua) y en la superficie de los elementos de la turbina es la Central Amaime. En esta central, en una base de concreto con cuatro etapas con rejillas de diferentes calibres se inicia el proceso de división de aguas, separando palos, ramas y sólidos de gran tamaño; en el siguiente paso, se libera lodo y arenilla y se separa un 20% del caudal del río. El agua se transporta por un túnel hasta la planta generadora de energía para accionar las turbinas; el túnel tiene una tecnología para evitar filtraciones de agua sedimentada provenientes de la montaña. Esta central está en jurisdicción de Palmira. A pesar de que se realizaron los estudios previos de caracterización de las aguas, las turbinas de la Central Amaime comenzaron a presentar un desgaste acelerado; por lo tanto, fue necesario realizar un estudio más profundo de los sólidos contenidos en el agua, implementar nuevos diseños en la captación del agua y, finalmente, aplicar un recubrimiento cerámico a las turbinas. Algunas de las principales diferencias entre la central Amoyá y la Amaime es su capacidad instalada, lo que implica que la central Amoyá necesita una cantidad mayor de agua; la caída es otra de las grandes diferencias entre las dos centrales, siendo mayor en la central Amoyá, aproximadamente 500 mca, lo que se convierte en una mayor energía cinética dirigida a las turbinas. (El Tiempo , 2017).

4.1.2 Estado del arte en recubrimientos cerámicos para aplicaciones de desgaste.

Para controlar el desgaste de los cangilones en la industria de la generación hidroeléctrica, se están utilizando los recubrimientos cerámicos. En general, un recubrimiento cerámico es una capa protectora compuesta de unos materiales con una composición química especial, que le añaden dureza, resistencia a la abrasión, resistencia a la temperatura, adhesión, entre otras propiedades, a la superficie del sustrato original. Estos materiales que componen el recubrimiento son conocidos como cerámicos avanzados y se dividen en dos grupos según su composición química: cerámicos óxicos, como la porcelana, esteatita, la cordierita, mullita, alúmina, sílice y magnesia, y cerámicos de tipo no óxido, como carburos, nitruros, siliciuros, etc.

Los cerámicos avanzados surgieron hace aproximadamente 50 años. Son obtenidos a través de materias primas de gran dureza, con un tamaño de partícula submicrónica, grandes presiones de conformado, y consolidado en estado sólido a grandes temperaturas de sinterización (Ver Figura 2); esta condición de fabricación da lugar a cuerpos totalmente densificados, que les da altas especificaciones técnicas.

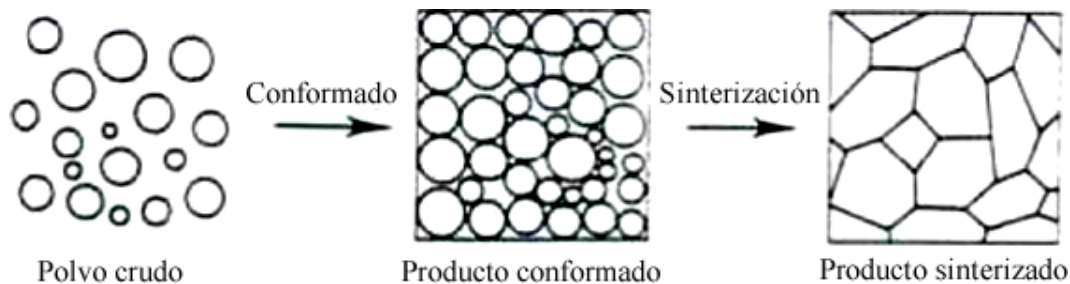


Figura 2. Cambio en la estructura por sinterización. Fuente: (Direct Industry, 2009)

La composición y estructura de los granos se controla de forma cuidadosa con el fin de lograr una mayor fiabilidad y rendimiento del cerámico. De igual manera se requiere un control de la proporción de los materiales y la operación de los procesos, con el fin de minimizar los defectos micro estructurales. Uno de los defectos más importantes son los poros, los cuales reducen la resistencia a la fractura al actuar como concentradores de tensión. (García & Monasterio , 2018)

Algunas de las tecnologías de aplicación de los recubrimientos cerámicos son las proyecciones térmicas, las cuales forman parte de la ingeniería de superficies. Éstas permiten construir recubrimientos con propiedades específicas. Las características comunes en este tipo de tecnologías es el aporte de energía cinética y térmica al recubrimiento que se desea aplicar, que en ocasiones puede ser en polvo o varilla. El recubrimiento inicialmente se funde total o parcialmente y luego se proyecta sobre una superficie limpia, en el cual forma una cohesión mecánica y metalúrgica con el sustrato. Las características del recubrimiento obtenido dependen esencialmente de la técnica de aplicación, de los parámetros (temperatura, velocidad) de aplicación y de los componentes del recubrimiento. Las técnicas se clasifican en función del origen y la fuerza de las energías aportadas, como se puede observar en la figura 3 (Bedoya , Cinca, & Guilemanuy, 2013)

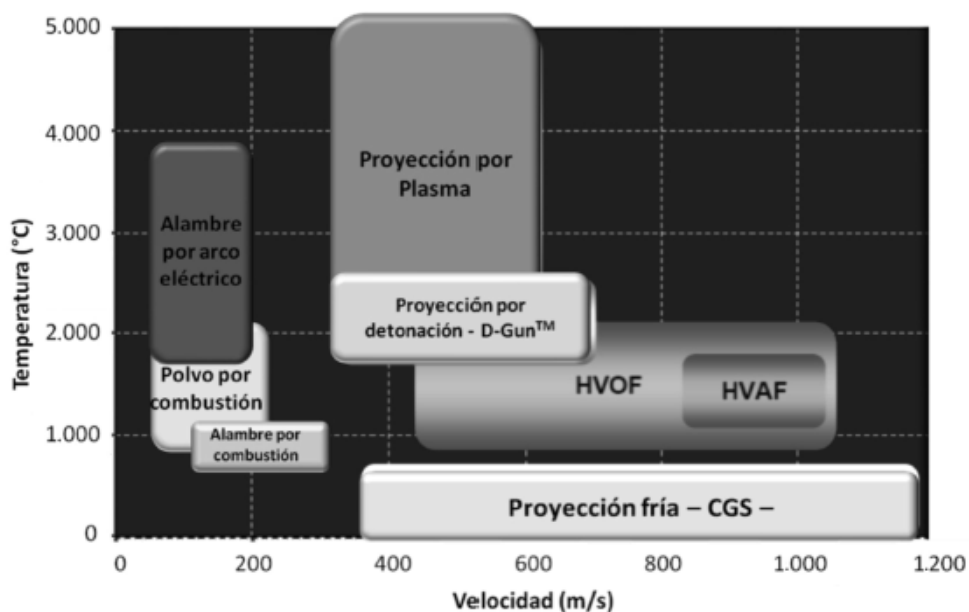


Figura 3. Clasificación de las tecnologías de proyección térmica según el rango de temperatura y velocidad de las partículas.

Fuente: (Bedoya , Cinca, & Guilemanuy, 2013)

En comparación con otros métodos de formación de películas superficiales, la proyección térmica representa una gran ventaja en cuanto a los materiales que pueden proyectarse y los sustratos que pueden utilizarse. Aunque el recubrimiento proyectado llegue fundido o casi fundido, el sustrato no se somete a altas temperaturas, por lo cual su forma, estructura molecular y propiedades mecánicas no cambian considerablemente. En la

Tabla 1 se muestran los tipos de recubrimientos cerámicos aplicados por proyección térmica y algunas aplicaciones de los mismos.

Tabla 1. Tipos de recubrimiento y sus aplicaciones.

Tipo de recubrimiento	Método de aplicación	Substrato	Piezas	Espesor (μm)	Micro dureza (HV)
ZrO ₂ -Al ₂ O ₃	Proyección térmica por combustión	Aceros al carbón	Ejes, bombas , rodillos, sinfines	223,1 \pm 27.,0	62,2
Cu-Al + Alúmina	<i>Cold Gas Spray</i> "Proyección fría"	Aluminio, bronce, titanio	engranajes, husillos válvulas, moldes,	12,3 \pm 2,0	286 \pm 21
Carburo de tungsteno	<i>HVOF</i> "Proyección térmica plasma"	Aceros inoxidables	Válvulas, cilindros, ejes, turbinas	3 \pm 5	1200
YSZ (Circonio estabilizado con itrio)	Proyección térmica por plasma atmosférico	Aleaciones con níquel	Alabes de turbinas a gas	20-70	120

A continuación, se resumen las características principales de algunos procesos de proyección térmica:

Proyección térmica por combustión: En este proceso, la energía cinética que se imparte a las partículas es suministrada a través de una corriente de aire comprimido y del flujo de los gases, mientras que la energía térmica es producida por una llama de combustión oxiacetilénica. Los gases utilizados para los procesos son oxígeno y acetileno a una presión de salida de 0,34 y 0,083 MPa, respectivamente, y su caudal es regulado con un flujómetro.

Proyección fría (Cold Gas Spray): En esta técnica el material proyectado no llega a fundirse, manteniéndose en estado sólido al llegar al sustrato. El material de recubrimiento en forma de polvo, se inyecta en un gas inerte y caliente a alta presión, que le confiere energía cinética y cierto aporte térmico, acelerándolo para impactar sobre el sustrato a velocidad supersónica (Ver Figura 4).

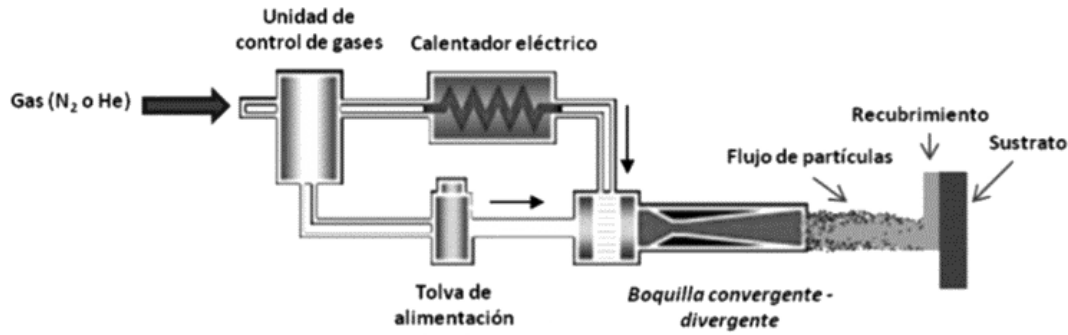


Figura 4. Estructura de la proyección térmica. Fuente: (Bedoya , Cinca, & Guilemanuy, 2013)

Esta técnica de proyección evita las oxidaciones tanto en el sustrato como en el recubrimiento, permitiendo proyectar materiales altamente reactivos. Al impactar las partículas, toda la energía cinética se convierte en energía de deformación plástica y calor disipado (Ver figura 5.)

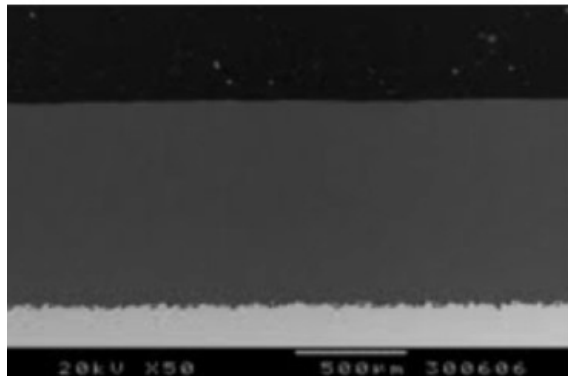


Figura 5. Micrografía de un recubrimiento de aluminio sobre un acero. Fuente: (Bedoya , Cinca, & Guilemanuy, 2013)

HVOF (Proyección térmica por plasma): “Este proceso utiliza una mezcla líquida de oxígeno-keroseno para el caso se usa combustible líquido, o propano, hidrógeno o gas natural en caso de que el combustible sea gas (Ver figura 6). Se utilizan una gran variedad de polvos como material de aporte, el cual se suministra en forma axial a través de la pistola. Generalmente, se utiliza nitrógeno como gas portador. El material de aporte es fundido y expulsado a una velocidad supersónica hacia la superficie a tratar; esta alta energía cinética y una baja temperatura utilizada permiten producir recubrimientos muy densos, duros y de una altísima adherencia, permitiendo además obtener capas muy gruesas, con estructuras finas y homogéneas(Ver figura 7). (Sobolev, Guilemany, & Calero, 1995).



Figura 6. Estructura de control de HVOF. Fuente: (Diaz, 2009)

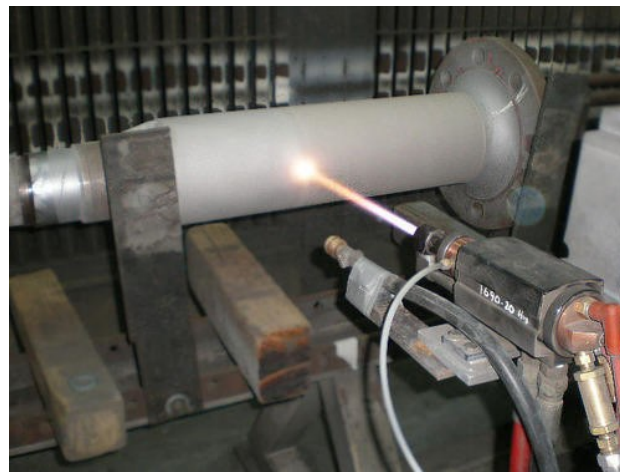


Figura 7. Pistola de aplicación de HVOF. Fuente: (Diaz, 2009)

Proyección térmica por plasma atmosférico: "Técnicamente el proceso se describe como la energización por medio de un arco de alta frecuencia de una mezcla de gases (generalmente argón, nitrógeno, hidrógeno y helio), que, al ionizarse, se transforma en una pluma de plasma gaseoso de altísima temperatura (entre 6.600 °C y 16.600 °C). Las partículas fundidas del material suministrado en forma de polvo, forman una fina niebla que se proyecta hacia la superficie a gran velocidad, impulsada por los gases. Éste es el más flexible de todos los procesos de proyección térmica, ya que se puede fundir cualquier tipo de material; además, posee un excelente control de los espesores y de las características de recubrimiento respecto a los otros procesos. (Sobolev, Guilemany, & Calero, 1995)"

Actualmente, en la industria aeroespacial, se están analizando la capacidad de adhesión de recubrimientos vítreos del sistema $Y_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ aplicados mediante proyección

térmica por llama oxiacetilénica. “Para ello, se realizan ensayos de rayado a carga creciente analizando el tipo y la carga de fallo y su relación con las propiedades elásticas y mecánicas de los recubrimientos. Los resultados de estas pruebas indican que la adhesión sobre los sustratos a base de carburo de silicio y sustratos de carburo de silicio reforzado con fibra de carbono es buena, mientras que el carbono reforzado no es un material adecuado para recubrir con este tipo de recubrimiento” (Textos científicos, 2006).

4.2 Marco teórico-conceptual

4.2.1 Centrales hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas son un conjunto de equipos que permiten aprovechar la energía potencial contenida en el agua de los ríos. Por medio de estos equipos y algunas construcciones civiles, la energía potencial se va convirtiendo en energía cinética, es decir, va perdiendo altura y adquiriendo velocidad. Al llegar a la turbina, esta energía se convierte en energía mecánica, que a su vez es convertida en energía eléctrica por medio del generador.

En la industria de la generación de energía por medio de agua, se pueden encontrar varios tipos de centrales hidroeléctricas que son clasificadas según dos criterios. La potencia instalada hace parte de uno de ellos y tiene la siguiente clasificación: micro central o centrales hidroeléctricas con una capacidad instalada de 1MW, pequeñas centrales con capacidad entre 1MW y 19MW, y centrales hidroeléctricas de gran potencia con capacidad desde 20 MW hacia arriba. Según su tipo de diseño, el cual está determinado por las condiciones del terreno donde se sitúa la central, se puede mencionar 3 tipos que son los más utilizados actualmente (Endesa educa, 2014):

- Centrales de embalse: básicamente consisten en la fabricación de una o varias presas que forman lagos artificiales y acumulan una cantidad considerable de agua (energía potencial). Este tipo de centrales tiene la ventaja que durante las temporadas de baja afluencia o en verano pueden seguir prestando el servicio de generación. Su desventaja más grande es que requiere una inversión más grande en su construcción que otros tipos de centrales (Ver figura 8). (Endesa educa, 2014).

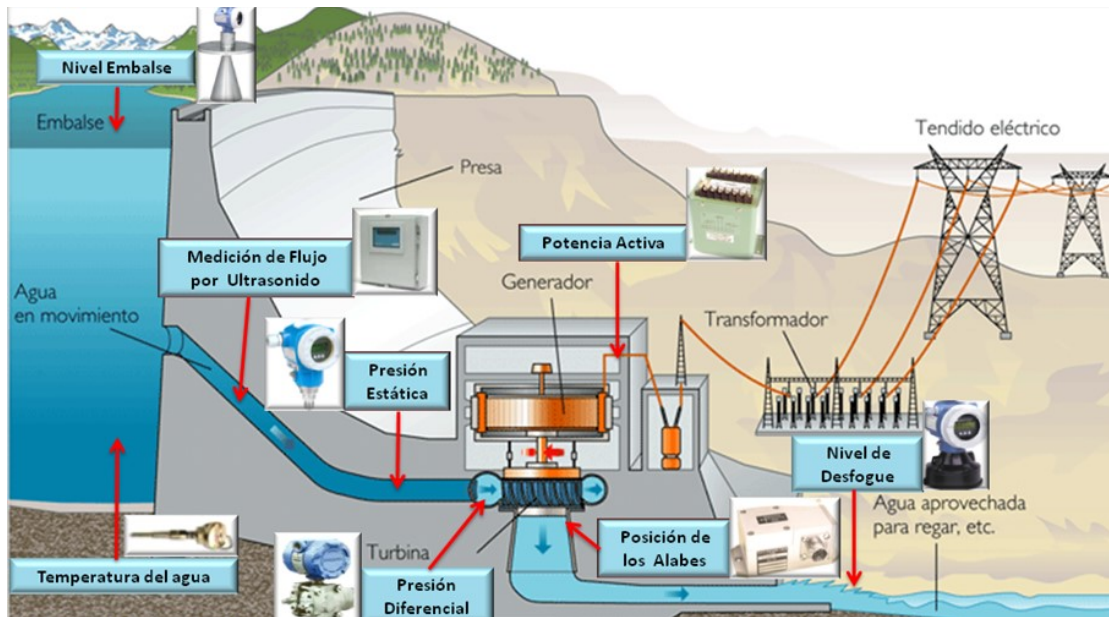


Figura 8. Central hidroeléctrica con embalse. Fuente: (ENULA, 2016)

- Centrales de agua fluyente o filo de agua: en este caso no existe embalse. Se construye una obra civil para captar todo el caudal posible del río y garantizar una potencia “constante” todo el año. Cuando inicia la temporada de lluvias puede generar toda su potencia instalada, pero en las temporadas de verano, la potencia disminuye en función del caudal, llegando en ocasiones a ser nula (Ver Figura 9). (Mujal Rojas , 202)



Figura 9. Diferencia entre una central con embalse y filo de agua. Fuente: (ISAGEN, 2017)

- Centrales de bombeo o reversibles: son centrales de generación especial, que hacen un uso más eficiente del recurso. Básicamente se componen de dos embalses a diferente nivel. En el momento donde la demanda de energía es máxima, la central funciona como una central convencional de embalse, llevando su agua desde el

embalse superior al inferior. Durante el tiempo o temporadas de menor demanda, el agua del embalse inferior es llevada al embalse superior para que realice nuevamente su ciclo productivo o se convierta en alimentadora de alguna planta de tratamiento de agua. (Ver Figura 10). (Sanz Osorio , 2008)

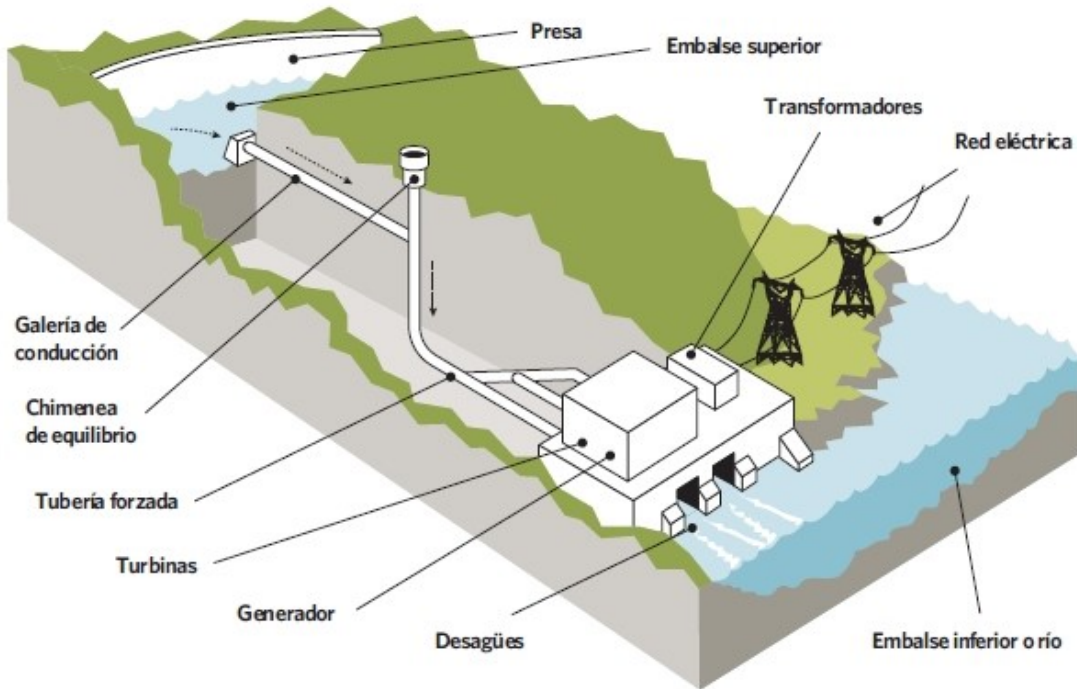


Figura 10. Central de bombeo. Fuente: (Ciencia Bosco , 2018)

Algunos de los equipos y obras civiles principales de las centrales hidroeléctricas son:

- La presa: es una construcción civil que forma una retención del cauce normal del río y genera un embalse.
- Casa de máquinas: Edificación civil donde se instalan los equipos principales de generación y todos sus equipos periféricos. Dentro de estos, los más importantes son las turbinas, elementos que son objeto de estudio en el presente proyecto. (Endesa educa, 2014).

4.2.2 Turbinas

Conceptos generales y tipos.

La turbina es el activo que recibe toda la energía cinética del agua y convertirla en energía mecánica. Las turbinas se clasifican en dos tipos:

- **Turbinas de acción:** “son aquellas en que la energía de presión del agua se convierte totalmente en energía cinética. El agua sale del distribuidor a presión atmosférica y llega al rodete a la misma presión” (Borja Galmés , 2015) (ver Figura 11)



Figura 11. Turbinas de acción. Fuente: (Alibaba.com, s.f.)

- **Turbinas de reacción:** "el agua sale del distribuidor a cierta presión que va disminuyendo a medida que el agua va pasando por los álabes, de forma que, a la salida, la presión puede ser nula o incluso negativa. En este tipo de turbinas la energía potencial del salto se convierte, una parte en energía cinética y la otra en energía de presión." (Borja Galmés , 2015) (Ver Figura 12).

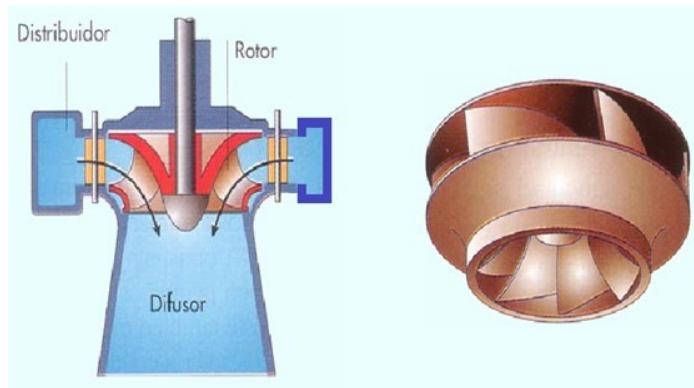


Figura 12. Turbina de reacción. Fuente (Universidad Nacional Experimental del Táchira, 2005)

Actualmente las turbinas que más se utilizan en la industria de generación, son turbinas tipo Kaplan, Pelton y Francis. El porcentaje de eficiencia de éstas se encuentra aproximadamente en 96%, 92% y 94% respectivamente. Las partes principales del conjunto turbina están relacionadas de la siguiente manera. La tubería de presión o de entrada está acoplada al distribuidor, el cual se encarga de distribuir homogéneamente el agua hacia las toberas o álabes fijos según el tipo de turbina. Al distribuidor también se le conoce como el caracol debido a su diseño o configuración. Las toberas en los rodetes tipo Pelton y los álabes fijos en los tipos Francis, son los encargados de dirigir el chorro de agua hacia los cangilones o álabes del rodete. Según la dirección en que entra el flujo a la turbina, se puede realizar una clasificación: 1) turbinas de flujo axial, en las cuales el flujo entra y sale paralelamente al eje de rotación de la turbina, y 2) turbinas de flujo tangencial, en las cuales el flujo golpea toda la periferia del rodete. (Universidad Nacional Experimental del Táchira, 2005)

Para el diseño inicial de una central hidroeléctrica, se debe tener presente dos variables muy importantes, como lo son la altura del agua o cabeza bruta (H), y el caudal disponible (Q). Con estas dos variables podemos, escoger el tipo de aprovechamiento que se ajuste a las condiciones dadas, como se muestra en Figura 13. En la figura se muestra la selección y clasificación de las turbinas según la altura (H) y el caudal (Q). Se puede observar que las turbinas Pelton requieren una altura mayor y caudal relativamente bajos. Por el contrario, las turbinas tipo Francis requieren una altura menor, pero un caudal mucho mayor. Según la selección que se realice en el diseño inicial, se

puede establecer la potencia de la máquina, que está dada bajo la siguiente fórmula (OCEUPE , 2020)

$$P = 9,81 * Q * H_n * e$$

Dónde:

H_n : cabeza neta de diseño.

Q: caudal nominal.

e: eficiencia de la turbina, que es igual al producto de los rendimientos de los diferentes equipos que intervienen en la producción de la energía: $e = R_t * R_g * R_s$.

R_t : rendimiento de la turbina.

R_g : rendimiento del generador.

R_s : rendimiento del transformador de salida

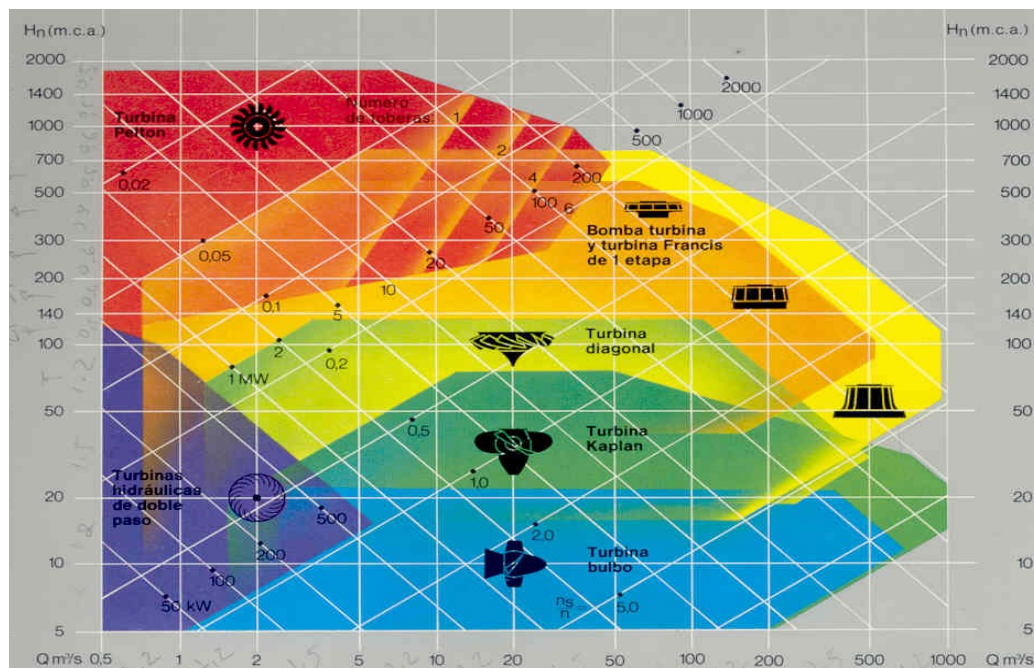


Figura 13. Tipo aprovechamiento de las turbinas. Fuente: (Suescún Monsalve , 2013)

Turbinas tipo Pelton.

Esta turbina fue patentada por el Ing. Lester A Pelton (1829-1908), el cual durante la época de minería en los Estados Unidos fabricó la primera turbina de este tipo (1880). Los elementos principales de una turbina Pelton son: el distribuidor, el rodete, la carcasa y el túnel de descarga. A continuación, una breve descripción de los mismos:

- **Distribuidor:** está compuesto por la cámara espiral y los inyectores. Estos últimos a su vez se componen de servomotores para su accionamiento, toberas, válvula de aguja y deflectores. La función principal del distribuidor es la de dirigir el chorro hacia la turbina y controlar la cantidad de agua que llega a ésta. El número de inyectores dispuestos en una turbina Pelton varía según la potencia instalada. Normalmente, se instalan hasta 6 inyectores. (Ver figura 14).
- **Rodete Pelton:** está constituido por una manzana que se acopla mecánicamente a un eje principal. De igual forma, incluye las cucharas o cangilones, que son los encargados de recibir toda fuerza del chorro, generando así el cambio de dirección del flujo y provocando el movimiento del rodete. Las partes principales del cangilón son: la escotadura, arista media, el intradós, el pico, el borde y la raíz (ver Figura 15) (Faeitch, 2012)

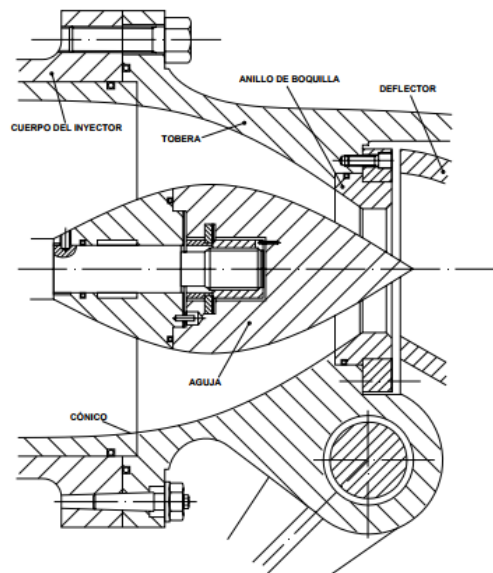


Figura 14. Partes del inyector. Fuente: (Universidad de Antioquia. 2014).

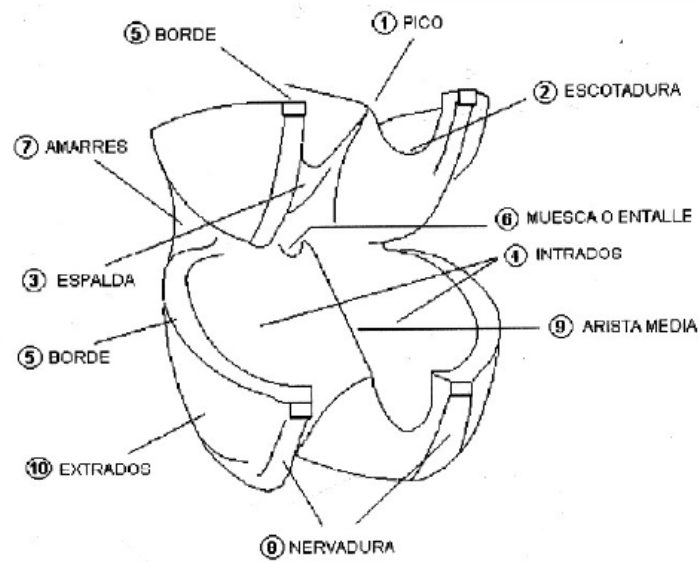


Figura 15. Partes de cangilón. Fuente: (Faeitch, 2012)

- **Cámara de descarga:** es una construcción civil, que se utiliza para evacuar las aguas que ya han realizado el intercambiado de energía. En algunas turbinas, se utiliza el cono aspiración que va unido por medio de una brida a la cámara o túnel de descarga (ver Figura 16).

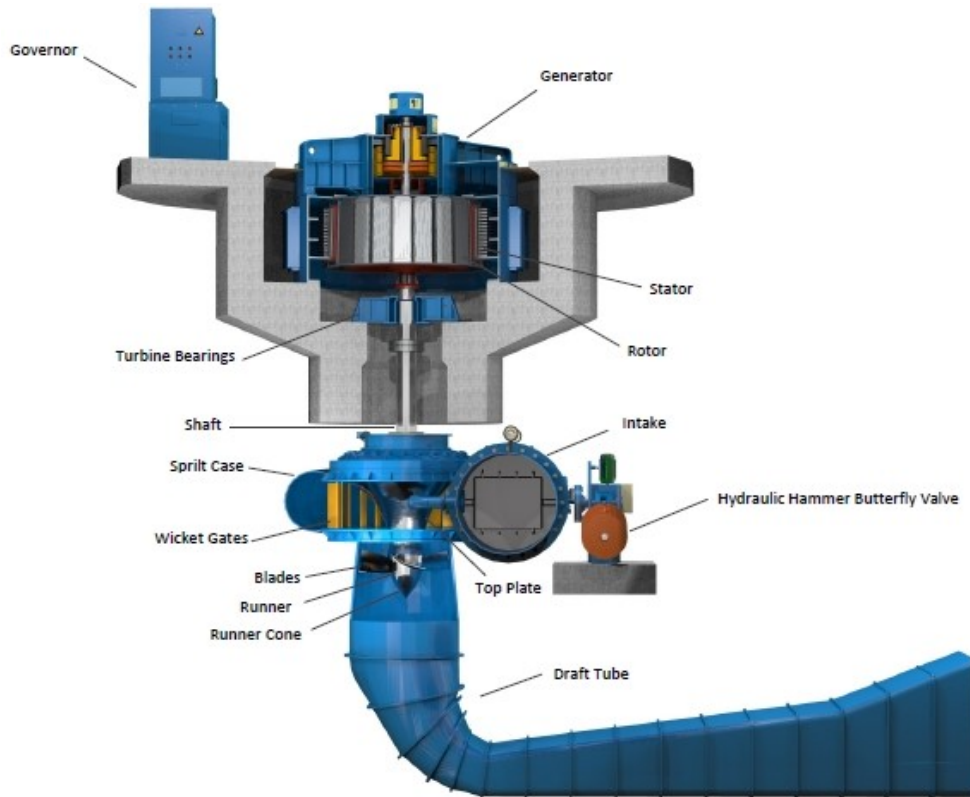


Figura 16. Cámara de descarga. Fuente: (Todo info)

“La velocidad específica, N_s , de una turbina es el número de revoluciones que daría una turbina semejante a la que se trata de buscar en el diseño y que entrega una potencia de 1Hp, al ser instalada en cierta altura (H). Para el caso concreto de las turbinas Pelton, la velocidad específica varía según el número de inyectores, así: N_s va de 5 a 30 con un inyector instalado y de 30 a 50 con varios inyectores instalados. La N_s está dada por la siguiente formula:” (Gómez, 2009)

$$N_s = \frac{ne}{h} \sqrt{\frac{N}{\sqrt{h}}} = \frac{ne\sqrt{N}}{h^{5/4}}$$

Dónde:

No: revoluciones por minuto (RPM)

N: potencia del eje o potencia al freno. (W)

H: altura neta o altura del salto. (m)

Con esta ecuación, se puede comprobar que, a grandes alturas, con una velocidad y una potencia dadas, se requiere una máquina con una velocidad específica baja, como son

las turbinas tipo Pelton. Por el contrario, una turbina de flujo axial con alta velocidad específica es la indicada para bajas alturas. No obstante, una turbina Pelton puede ser adecuada para trabajar en zonas de poca altura, si el caudal o la potencia requerida son pequeños. Pero en estas condiciones, el tamaño de la rueda para estas especificaciones llega a ser exagerado y la inversión inicial alta, en comparación con la potencia producida.

Además, de esta ecuación se observa que la velocidad específica de una turbina depende del número de revoluciones por minuto, cantidad que tiene un límite según el tipo de turbina. Además, debe tenerse en cuenta que para cada altura o salto existe un cierto número de revoluciones con el cual el rendimiento es máximo; a este punto se le denomina punto nominal de funcionamiento de la turbina. (Universidad Nacional de Asunción, 2011)

4.2.3 Desgaste en turbinas.

Conceptos básicos.

El tipo de material en que se construyen actualmente las turbinas es un acero martensítico (XCrNiMo13-4), el cual contiene molibdeno, cromo y níquel. Tiene una alta resistencia a la abrasión y corrosión. Los rodetes se pueden fabricar fundidos o forjados; la segunda técnica es preferida en la actualidad porque anteriormente se venían presentando muchos inconvenientes en la fundición: poros, fisuras e imperfecciones. (Andritz, 2017)

El desgaste es definido como el daño superficial al que se ve enfrentado el material después de determinadas condiciones de trabajo. El resultado es la pérdida de su geometría inicial y la subsiguiente disminución de las dimensiones. En la mayoría de casos, es el factor que determina la vida útil y la eficiencia de los componentes de las turbinas.

Los desgastes se producen por el contacto de la pieza con un abrasivo no metálico o metálico (desgaste abrasivo), o con líquidos o gases en movimiento (erosión y cavitación). El ambiente, el acabado de las superficies, presencia de partículas sólidas, dureza del material, entre otros, son sólo algunos actores que influyen en el desgaste de las turbinas. El desgaste abrasivo se define como el corte o desprendimiento por parte de

un material duro y agudo sobre la superficie de un material con menos dureza. Cuando las partículas duras impactan en la superficie, tienden a formar ralladuras profundas, ocasionando deformación plástica y/o arranque de virutas. En las turbinas, la principal causa del desgaste es el material sólido que se encuentra suspendido en el agua que se dirige hacia la turbina, las cuales “arrancan” material de los cangilones por su alta energía cinética y forma geométrica. El desgaste por fatiga también se presenta en las turbinas Pelton, evidenciándose principalmente en la raíz del cangilón, la cual es sometido a grandes esfuerzos, provocando la creación y propagación de grietas. (Sánchez, 2016)

Otro tipo de desgaste muy común en las turbinas es el desgaste por cavitación, el cual consiste en la formación de pequeños espacios de aire (cavidades) en el líquido. La formación de estas “bolsas” de aire tiene lugar cuando la presión de un líquido está por debajo de la presión de vapor. “Es conocido que, si la presión de un líquido disminuye lo suficiente, comenzará a evaporarse; esto es: una parte del mismo sufrirá una transformación de fase, pasando del estado líquido al gaseoso”. La presión a la que este fenómeno tiene lugar es la denominada presión o tensión de vapor de saturación, valor que depende de la temperatura del fluido. El efecto que se produce por la presencia de la cavitación en las turbinas Pelton se manifiesta en la decoloración del material, y a medida que el daño comienza a ser mayor, el material puede empezar a desprenderse del cangilón, lo que es conocido como el fenómeno de erosión por cavitación. (Universidad Popular del Cesar, 2017).

- Caracterización del desgaste en cangilones.

Para medir el desgaste de los cangilones en las turbinas Pelton, se maneja la técnica del plantillado. Ésta consiste básicamente en diseñar unas plantillas en acero, las cuales tienen el mismo perfil de los cangilones de fábrica (sin ningún desgaste). El nivel de desgaste se mide comparando el estado de la superficie del cangilón en operación con el de la plantilla. Por ejemplo, en la Figura 17, se evidencian varios daños por desgaste en el perfil del cangilón.

En la técnica de plantillado, se realiza la siguiente secuencia de identificación de los tipos de daños y las reparaciones necesarias (Ver Figura 18).

- Se realiza la medición del desgaste por medio de las plantillas.

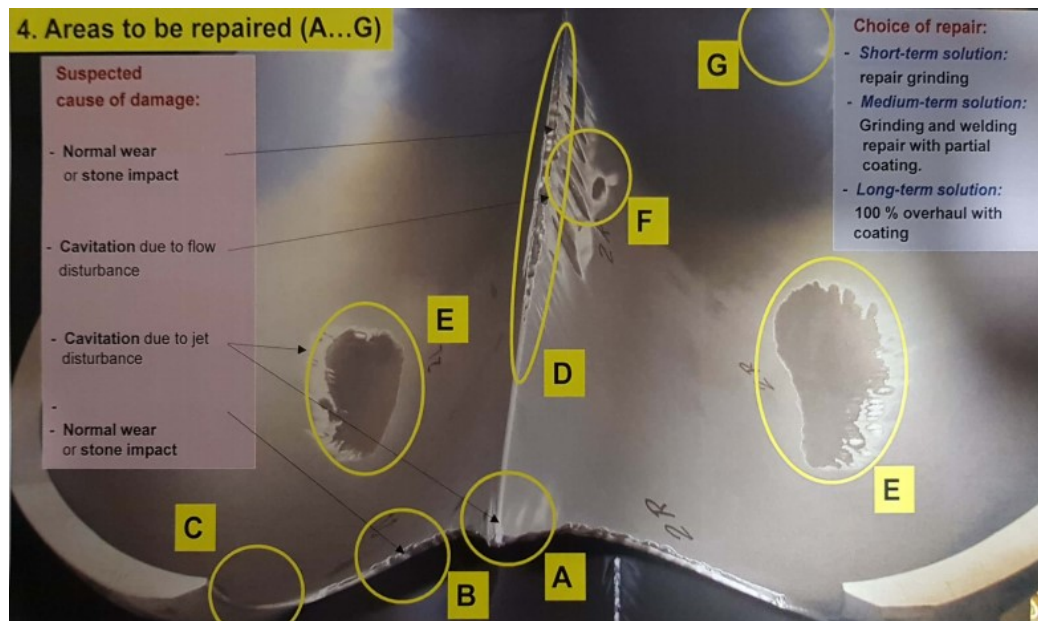


Figura 17. Tipos de desgaste en un cangilón. Fuente: (Andritz, 2017) (Turbina Pelton central hidroeléctrica en Suiza)

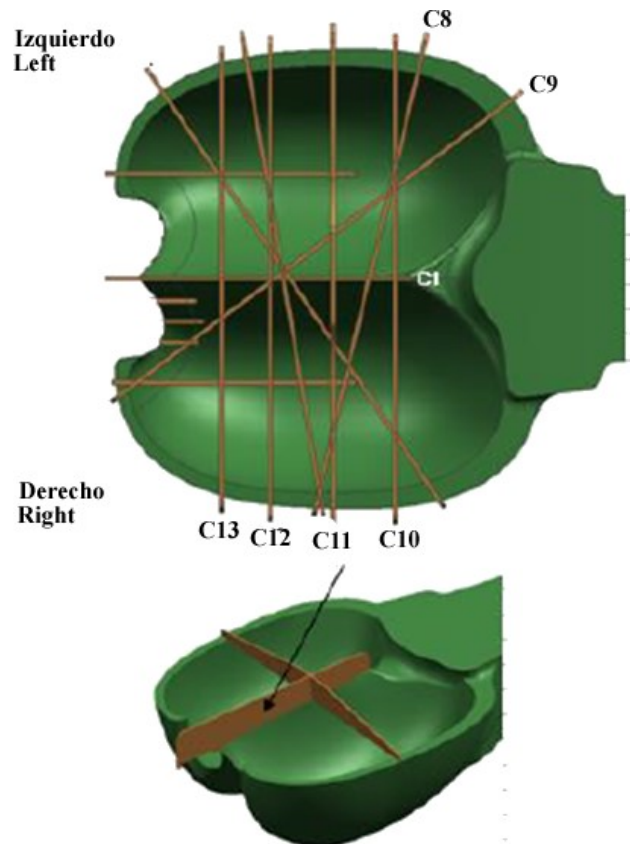


Figura 18. Técnica de reparación. Fuente: (Andritz, 2017)

- Se realiza un control del perfil hidráulico del cangilón. (Ver Figura 15).
- Se realiza un pulido de la zona afectada del cangilón.
- Con estos datos se realiza la evaluación y cantidad de soldadura que será necesario aplicar al cangilón para recuperar su perfil original.

4.2.4 Mantenimiento preventivo en turbinas tipo Pelton.

Las operaciones de mantenimiento se realizan a las turbinas para evitar daños significativos, altos costos por reparaciones, tiempos muertos elevados, etc. Entre los equipos más complejos y costosos que se utilizan en la generación de energía eléctrica se encuentran los rodets. Su funcionamiento debe vigilarse de manera continua tanto para detectar fallas potenciales o incipientes, como para programar la inspección del desgaste, a fin de aumentar su confiabilidad, disponibilidad, eficiencia y vida útil. (Universidad EIA, 2019)

El sistema interconectado eléctrico de un país tiene disponibles varias plantas de generación de diferentes tipos y capacidad instalada. Por ende, cada una de ellas incluye una gran cantidad de equipos, que enfrentan diversos problemas, lo que hace necesario mejorar las prácticas de mantenimiento y pasar de un mantenimiento correctivo a un mantenimiento basado en condición. “Algunos estudios realizados indican que el costo de mantenimiento representa entre un 15% y 40% de los costos totales de la producción de las centrales de generación hidroeléctrica. Otras estadísticas revelan que entre el 10% y el 30% de todo el tiempo perdido en las plantas de generación se debe a operaciones de mantenimiento correctivo por fallas en los equipos rotatorios.” (Universidad EIA, 2019).

Un plan de mantenimiento basado en condición está diseñado para conocer el estado actual y la evolución de los equipos principales de la Central, obteniendo la máxima información de cómo el funcionamiento afecta la vida del rodete, generador y del transformador, con el objetivo de detectar cualquier anomalía antes de que origine un grave daño y una parada no programada. Este plan de mantenimiento basado en condición se ha convertido en una herramienta fiable para asegurar la disponibilidad de los equipos. Este plan se conforma básicamente de las siguientes actividades:

Análisis de los espectros de vibración: durante el funcionamiento de una Central Hidroeléctrica, el grupo Turbina - Generador está expuesto a la acción de diferentes fuerzas excitadoras; al momento de identificar y evaluar los espectros de vibración y armónicos presentes en la unidad, separando aquellas que son propias del funcionamiento, de aquellas otras que tienen su origen en algún daño que se pueda estar presentando en sus elementos, se realiza mediante un estudio y análisis especializado de vibraciones y pulsaciones (Jimenez & Gatica, 2002)

- Conocimiento de la máquina: “Las características constructivas y de funcionamiento determinan los posibles defectos y problemas resultante de los mismos, lo cual hace necesario el conocimiento profundo de la máquina, de sus condiciones de funcionamiento y de los fenómenos físicos asociados al mismo.” (Olarte, Botero, & Cañon, 2010)
- Criterios de valoración: “Una vez que un defecto ha sido localizado e identificado, se determina su grado de importancia; para la valoración se considera tanto el nivel como las características del mismo. El criterio para la valoración de defectos se basa en la existencia de un banco de patrones representativos, así como en las medidas históricas de la unidad.” (Universidad EIA, 2019)
- Controles periódicos en el rodete: Desde el momento de la puesta en servicio de un rodete deben controlarse todo tipo de desgastes en los periodos indicados a continuación (ver Programa de **mantenimiento de una turbina.**):

Tabla 2. Programa de mantenimiento de una turbina.

Intervalo / horas	Inspección
250	Control Visual
450	Control Visual /Ensayos no destructivos (END)
900	Control perfil con plantillas
1800	END / Control dimensional

(Universidad EIA, 2019)

Estos intervalos de tiempo se deberán iniciar de nuevo para rodetes en los que fueron efectuados soldaduras de reparación en los cangilones.

Revisiones: Cada 8000 horas de servicio hay que someter la turbina a una revisión completa. Para ello es necesario realizar las siguientes labores:

- Control del rodete a fisuras y superficies desgastadas. Especial atención hay que dedicar a los cangilones y la raíz. Si se encuentran fisuras no se debe continuar usando el rodete. Montar un rodete de reserva y reparar el rodete defectuoso según instrucciones para soldaduras de reparación.
- Controlar a desgaste las puntas de aguja, asientos y deflector de las toberas. Si se encuentran fallas cambiar la pieza con una de repuesto.
- Controlar el nivel de los aceites y el estado de limpieza, salud, bajo la norma ISO 4406. De ser necesario realizar filtración en sitio con ayuda de carretas filtrantes.
- Controlar el ajuste firme (torque) de las uniones de tornillos, pernos de pretensado y seguros en toda la turbina.
- Controlar si la pintura del recinto de turbina tiene fallas y/o corrosión en la superficie en contacto con agua en especial la superficie de la tubería del distribuidor y del foso de la turbina. En el caso de tener fallas hay que desoxidar y proteger con pintura de acuerdo a las instrucciones de conservación (Universidad Nacional de Ingeniería, 2006).

5. Diseño Metodológico

5.1 Evaluación del tipo de sólidos suspendidos que contiene el agua del Rio Amoyá.

Para el estudio de la viabilidad de la aplicación del recubrimiento, se realizó una caracterización y evaluación del agua con el fin de identificar el tipo de sólidos en suspensión que contiene. Las muestras obtenidas se analizaron con pruebas de laboratorio como:

Tipos de pruebas realizadas al agua del rio Amoyá:

- Difracción por rayos X por el método de polvo.
- Mineralogía óptica de arenas.
- Análisis de secciones.
- Microscopia electrónica (SEM): Se realizó la identificación y estimación porcentual de materiales.
- Caracterización por granulometría de los sólidos: Se hizo con el fin de conocer los sólidos que contiene el agua. El método empleado fue tamizado y método Coutler.

Como entrega final de todos los análisis realizados, se obtuvieron resultados donde fue posible establecer la forma, el tipo y la dureza de los minerales que ingresaban directamente a la turbina. Los minerales más representativos durante las muestras fueron el cuarzo, la Horblenda, la Magnetita y Feldespato los cuales poseen una dureza de Mohs de 7; 5,5; 6 y 4,5 respectivamente.

Los métodos realizados para la evaluación de los sólidos suspendidos y el resultado entregado en cada uno de estos, fue el siguiente:

- Difracción por rayos X por el método de polvo:

Este método técnicamente es conocido como cristalografía por rayos X, se utiliza para el estudio y análisis de materiales, el cual arroja la medida del tamaño del sólido (ver Figuras 19: DRX con identificación de fases).

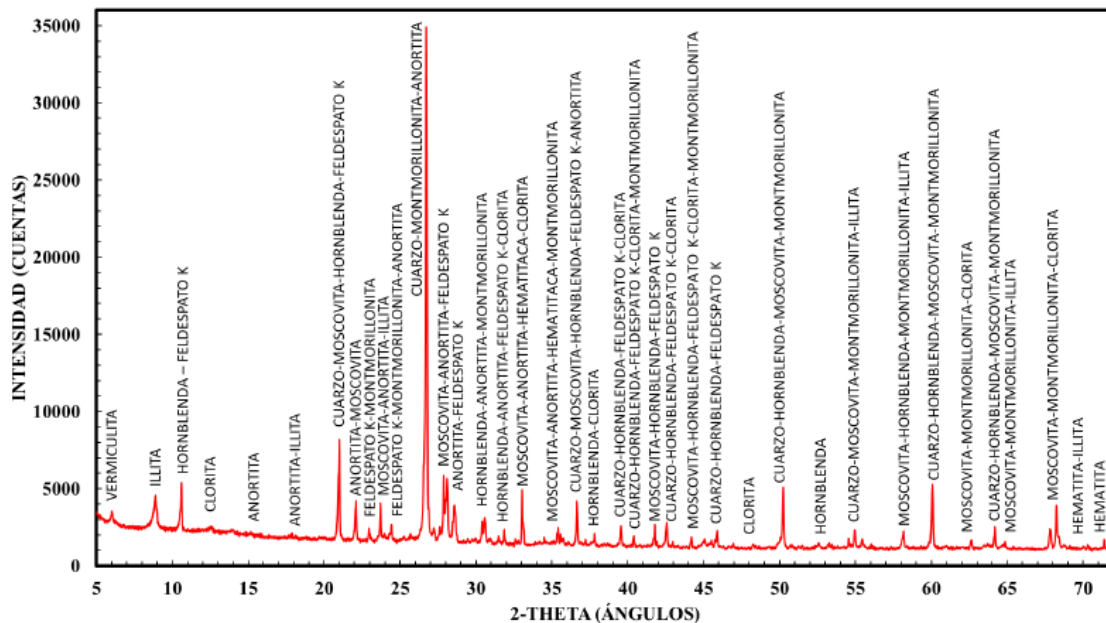


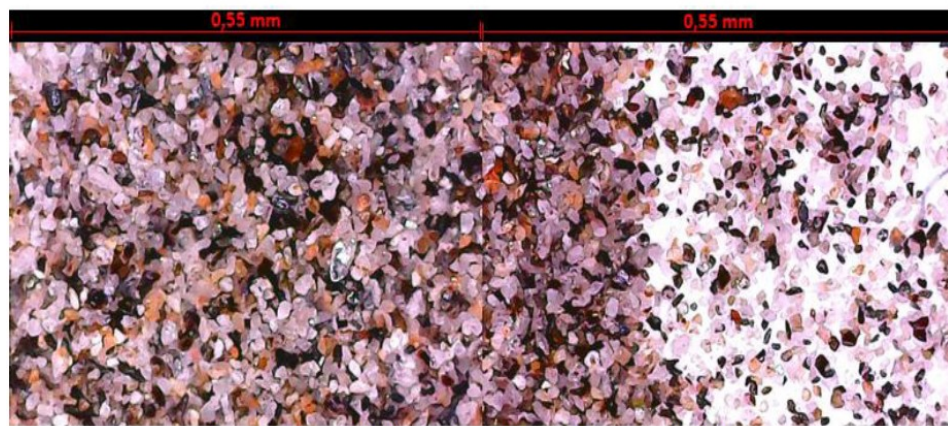
Figura 19. DRX con identificación de fases.

Descripción general de la prueba:

Se realizó un barrido de difracción tipo Rietveld con ángulo 2θ entre 5° - 80° , con un ángulo por paso de 0.013° y 50 segundos por cada paso, con una radiación de $\text{Cu K}\alpha_1/\text{K}\alpha_2$ ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) con el fin de obtener mayor resolución y reducir el ruido de cada difractograma.

Mediante el software X'pert HighScore Plus se realizó la identificación de las fases presentes en el ítem bajo prueba siguiendo la metodología siguiente, Inicialmente se determina el background del difractograma, así como la búsqueda de picos que corresponden a las fases minerales presentes, los cuales se comparan con la base de datos de patrones cristalográficos de Crystallographic Open Database COD.

- Mineralogía óptica de arenas: es el desarrollo de caras cristalográfico de un mineral. Cuando un cristal está bien cristalizado su forma externa está caracterizado por un conjunto de caras formando un determinado poliedro, que es característico de cada especie mineral y por lo tanto da un criterio para su identificación. Por lo tanto el resultado entrega la clasificación, descripción y nomenclatura de las distintas rocas que se encuentran en el agua, y con ayuda de un microscopio petrográfico es posible identificar el tipo y composición mineral (ver Figura 20: Muestra de granulometría que entrega el microscopio).



Panorama general de las muestras, bajo análisis por medio de lupa.
Izquierda y derecha permiten observar la porción arenosa. La porción arcillosa envuelve algunos cristales más grandes y son difíciles de distinguir en la fotografía, pero diferenciable para el ojo en lupa.

Figura 20. Muestra por lupa binocular.

Esta técnica se empleó con el fin de confirmar las fases minerales presentes en las muestras, así como texturas y formas de grano (morfología). Las imágenes de SEM se tomaron en un equipo marca JEOL JSM 5910 LV, con detector de estado sólido tipo EDS marca OXFORD para los análisis micro químicos. En modo de observación BSE (electrones retro proyectados) y voltaje de aceleración de 20 kV y un tiempo de colecta de 70 segundos, se usaron magnificaciones entre 500X y 3000X. Las muestras fueron montadas previamente en secciones pulidas y metalizadas con oro. Las muestras seleccionadas para los análisis mineralógicos son estadísticamente representativas de la muestra original.

Microscopia electrónica (SEM): el objetivo principal es determinar la morfología del grano. Se basa en la obtención de una imagen de la muestra, a partir del barrido de la misma por medio de un haz de electrones, como resultado de las interacciones entre los electrones incidentes y la muestra (ver Figura 21 Mapeo SEM y Figura 22: Química y morfología de las principales fases presentes en la muestra.)

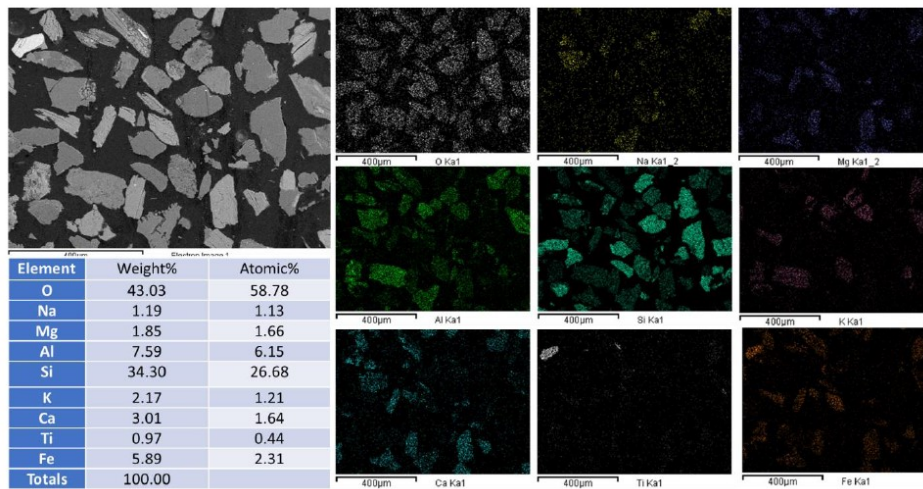


Figura 21. Mapeo SEM y química de la muestra.

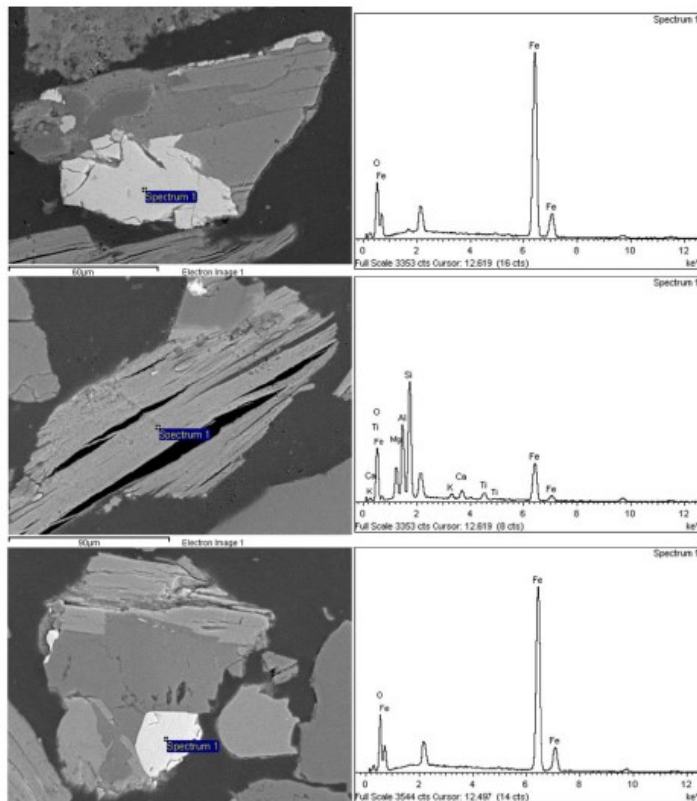


Figura 22. Química y morfología de las principales fases presentes en la muestra.

Microscópicamente las muestras se han sometido a difracción de rayos X por el método del polvo, mineralogía óptica de arenas (sin fraccionamiento) 50 y 250 micras, análisis de secciones delgadas y microscopía electrónica (SEM) para identificación y estimación porcentual de materiales.

Por otra parte, para su caracterización cuantitativa se recurrió a las pruebas de granulometría por método de tamizado y método Coulter. La Distribución granulométrica de sólidos (Sedimento de fondo) se valora por el método Coulter cuando la mayoría de las partículas tienen un tamaño en orden de magnitud aproximadamente entre 0.01 micras hasta 900 micras, que corresponde a la capacidad de detección del equipo. Mientras que la granulometría por tamizado comprende partículas retenidas hasta el tamiz #325 (45 micras). De esta manera fue posible realizar una mejor caracterización del material teniendo en cuenta partículas grandes y pequeñas, obteniendo una mejor estimación de los diámetros característicos de las muestras.

Para el análisis de las diferentes pruebas que se le realizaron al agua del río Amoyá, se definieron sectores aguas arriba y aguas debajo de la casa máquinas. El sector aguas arriba correspondió a toda la infraestructura de captación del agua, donde se incluía la entrada a los desarenadores, el azud y el túnel de carga, para el sector aguas abajo se tomó como punto de muestreo el túnel de descarga de las unidades de generación.

Los espacios muestrales para las diferentes pruebas de laboratorio fueron definidos en una mesa técnica, donde se involucraron los diferentes aspectos a tener en cuenta para obtener el mejor resultado posible en esta caracterización, se definieron puntos de toma durante el caudal normal del río (temporada de verano), crecientes súbitas del río (temporada de invierno) y caudales medios, con el fin de obtener resultados cualitativos en algunas pruebas que permitían este tipo de entrega y así contemplar todos los escenarios posibles a los cuales iba a ser sometido el recubrimiento cerámico. Ver Figura 23 Mecanismo de erosión en los cangilones de una turbina Pelton.

“Thapa y Brekke (2004), basados en diferentes plantas de energía hidroeléctrica concluyen para las turbinas Pelton: a) Si las partículas son finas (limos), entonces habrá erosión en la aguja, pero poca erosión en los alabes de la turbina (cubos); b) Si las

partículas son gruesas (arena) habrá erosión en los alabes (cucharón) con menos erosión en la aguja del inyector; c) Con partículas de tamaño medio, se irán erosionando tanto la aguja como los alabes de la turbina y d) La micro-erosión se genera por partículas de un tamaño menor a 60 micrómetros (0.06 mm-Limos).”

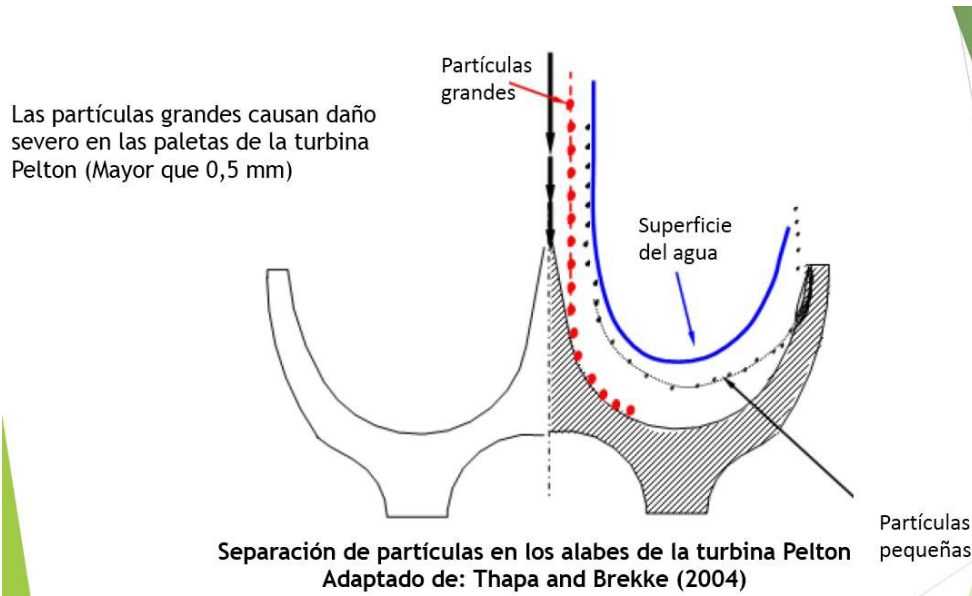


Figura 23. Mecanismo de erosión en los cangilones de una turbina Pelton.

5.2 Comparación del grado de desgaste entre el rodete anterior y el rodete con recubrimiento

El principal fenómeno que afecta la vida útil de un rodete tipo Pelton, es básicamente la abrasión por erosión y cavitación. El avance de éste con el tiempo se ve registrado en las inspecciones por mantenimiento, las cuales deben incluir pruebas por END, verificación del grado de desgaste usando las plantillas con el perfil original del rodete (esto para un rodete sin recubrimiento), medir el espesor del recubrimiento en las zonas de contacto inicial del agua y la salida de esta, inspección de posibles golpes por entrada de elementos duros etc.

Para comparar el grado de deterioro en el tiempo de un rodete sin recubrimiento vs un rodete con recubrimiento cerámico a base de carburo de tungsteno, se comparan las inspecciones realizadas en el mismo intervalo de tiempo y se ilustraran los hallazgos más representativos.

Las inspecciones que se utilizaron para realizar la comparación fueron a las 500hrs de operación, 1500hrs, 4000hrs, 8000hrs y 10000hrs de operación, para el presente proyecto no se alcanzó a realizar la inspección de las 10000hrs al rodete con recubrimiento; sin embargo, se logró evidenciar una curva de comportamiento muy positiva del desgaste con respecto al rodete anterior.

El alcance para las inspecciones de cada uno de los rodetes se definió en base al sustrato y las inspecciones que se podían aplicar, a modo de ejemplo a un rodete con recubrimiento cerámico no se le puede aplicar tintas penetrantes en la zona donde tiene recubrimiento porque será una medida errónea por la porosidad que se puede presentar, siendo así que para el rodete sin recubrimiento se aplicaron las siguientes inspecciones según el intervalo de tiempo ya mencionado:

- Inspecciones visuales
- Aplicación de líquidos penetrantes.
- Aplicación de partículas magnéticas.

- Determinar condiciones actuales del rodete por medio de las plantillas con el perfil original.

Normas aplicables:

- Código ASME Sección V. Artículo 6. Inspección con líquidos penetrantes.
- Código ASME Sección V. Artículo 7. Inspección por medio de partículas magnéticas.
- Código ASME Sección V. Artículo 9. Inspección visual.
- Código ASME Sección V. Artículo 4. Inspección por medio de ultrasonido.
- Norma ASTM E 709 y ASTM E 1444. Estándares para inspección por medio de partículas magnéticas de contraste y fluorescentes, aplicables por vías secas y húmedas.
- Norma ASTM E 165. Estándares para inspección por medio de líquidos penetrantes.
- CCH – 70 – 3. Cahier des Charges de Reception des pieces en Acier Moule pour Machines Hydrauliques.
- Plantillas elaboradas para determinar desgastes en los cangilones.

Materiales y Equipos utilizados:

- Eliminador Magnaflux SKC- S.
- Penetrante clase 1 (Fluorescente) Magnaflux.
- Revelador Magnaflux SKD - S2.
- Partículas magnéticas húmedas fluorescentes referencia: Magnaglo 14 AM. Partículas magnéticas húmedas rojas de contraste, referencia: WA 2B + 9CM.
- Yoke electromagnético MAGNAFLUX. Modelo Y 7 AC/ DC. PT. N0. 43550.
- Lámpara de luz negra (luz ultravioleta) referencia modelo MB - 100. Longitud de onda UV 365 nm.
- Kit de inspección visual AWS.

- Equipo de ultrasonido Krautkramer USM GO.
- Regla metálica, pie de rey.
- Cámara fotográfica Canon.
- Espejo retrovisor telescópico.

Los puntos de muestro para realizar las inspecciones fueron en gran porcentaje los cangilones en toda su geometría (intrados superior e inferior, arista media, escotaduras etc.) y para la zona donde mayor esfuerzo tiene el cangilón la cual es la raíz se realizaron con mayor atención los líquidos penetrantes y partículas magnéticas. (Ver figura 24 Partes del cangilón).

Para realizar las inspecciones del rodete con recubrimiento el alcance fue el siguiente:

- Inspecciones por líquidos penetrantes solo en la zona del cuello del cangilón.
- Inspección por partículas magnéticas solo en la zona del cuello o raíz del cangilón.
- Inspección visual y medición del espesor del recubrimiento aplicado.

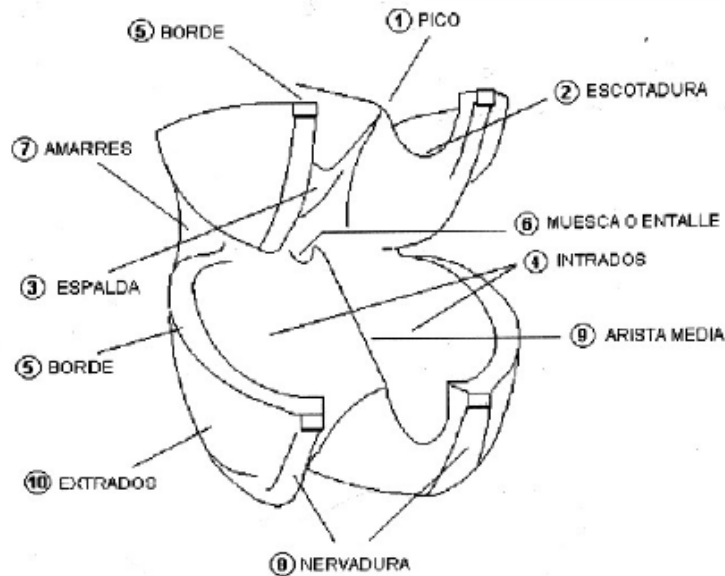


Figura 24. Esquema partes del cangilón de una turbina Pelton.

Normas aplicables:

- Código ASME Sección V. Artículo 7. Inspección por medio de partículas magnéticas.
- Código ASME Sección V. Artículo 9. Inspección visual.
- Norma ASTM E 709 y ASTM E 1444. Estándares para inspección por medio de partículas magnéticas de contraste y fluorescentes, aplicables por vías secas y húmedas.
- Norma ASTM E 165. Estándares para inspección por medio de líquidos penetrantes.
- CCH – 70 – 4. Cahier des Charges specification for inspection of steel castings for hydraulic machines
- ASTM D 1186 Standard test methods for nondestructive measurement of dry film thickness of nonmagnetic coatings applied to a ferrous base.

Materiales y equipos utilizados:

- Partículas magnéticas húmedas fluorescentes referencia: Magnaglo 14 AM.
- Partículas magnéticas húmedas rojas de contraste, referencia: WA 2B + 9CM.
- Yoke electromagnético MAGNAFLUX. Modelo Y 7 AC/ DC. PT. N0. 43550.
- Lámpara de luz negra (luz ultravioleta) referencia modelo MB - 100. Longitud de onda UV 365 nm.
- Kit de inspección visual AWS.
- Regla metálica, pie de rey.
- Cámara fotográfica Canon.
- Espejo retrovisor telescópico.
- Plantillas elaboradas para determinar desgastes en los cangilones.
- POSITECTOR 6000 FS1 (certificado 16-419217)
- Probador: S/N 275865
- Escalerillas Gardco, 8 filminas. (Certificado LML-0266-16).

Durante las inspecciones programadas para el nuevo rodete con *revestimiento*, se tenía proyectado de la siguiente manera. Estas tenían ser realizadas por un ente externo, que en este caso fue la empresa Endicontrol, que cuenta con ingenieros certificados en END (Ensayos No Destructivos), las horas de servicio para realizar las diferentes pruebas fueron planeadas durante la cláusula de garantía, estas se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3. Intervalos de inspección al rodete con *revestimiento*.

N°	Periodo	Horas de servicio
1	T ₀	500 +/- 150
2	T ₁	1500 +/- 150
3	T ₂	4000 +/- 150
4	T ₃	8000 +/- 150
5	T ₄	16000 +/- 150
6	T ₅	24000 +/- 150
7	T ₆	32000 +/- 150
8	T _i	40000 +/- 150

Nota: Dentro de las inspecciones que se hicieron durante el alcance de este proyecto se encuentran hasta la T₃, por este motivo se encuentra subrayada dentro de la Tabla 3.

Estos mismos intervalos de tiempo serán usados para comparar el grado de deterioro del rodete sin recubrimiento.

PROCEDIMIENTO PARA MEDIR EL ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.

La inspección se realizó de la siguiente manera:

Inspección a los 21 cangilones que tiene la rueda, haciendo énfasis en las partes del intradós como: Escotaduras, arista media, pico, raíz de los cangilones, bordes, además en los estrados y la manzana.

Ubicación de plantillas en 4 cangilones, con el fin de trazar los puntos donde se realizaría la medición del revestimiento, con el fin de obtener los valores actuales del revestimiento y de esta manera poder comparar en un futuro y definir el desgaste.

- Proceso de medición del espesor de revestimiento.

Para determinar el espesor del revestimiento cerámico del rodete se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se tomaron los cangilones 4, 7, 11 y 17.
2. Se utilizaron las plantillas Q2, Q3 y Q4, se posicionaron sobre el rodete y se realizaron los trazos sobre el mismo, sobre cada una de las líneas, se realizó una medida cada 5 cm, desde el borde inferior hasta la arista media, y desde la arista media hasta el borde superior, se siguió con la misma secuencia (ver Figura 25).

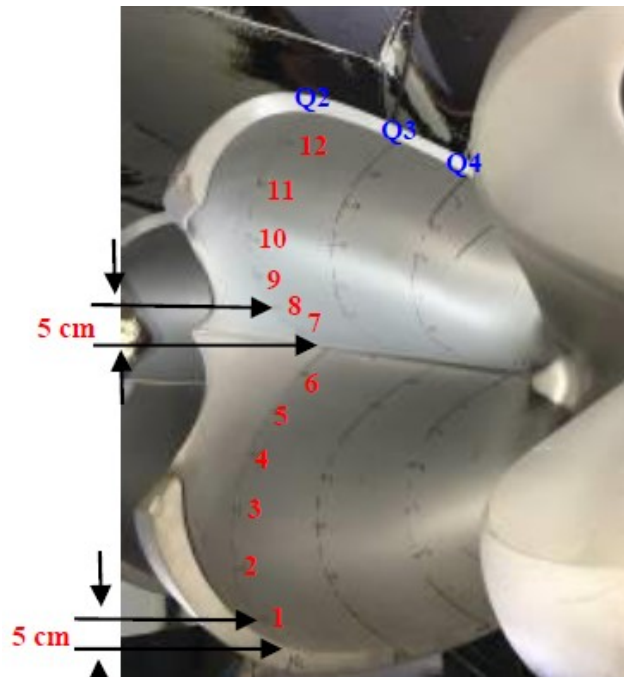


Figura 25. Plantillado cangilón.

En el anexo E, se puede observar la forma correcta de instalar las plantillas para medir el espesor del revestimiento en las diferentes zonas del cangilón.

3. Sobre cada uno de estos puntos se tomaron las medidas de espesor de revestimiento del intradós.
4. Para tomar las medidas en la entrada del agua, se tomó la plantilla de escotaduras y sobre esta se marcaron tres puntos a 2, 5 y 8 cm, posteriormente se posicionó sobre el cangilón y se marcaron en el intradós inferior y superior, dichos puntos, como se muestra en las Tabla 5 y Tablas 26-29 (Ver Anexo A).

5.3 Determinación del comportamiento del recubrimiento cerámico a base de carburo de tungsteno en la protección de los cangilones del rodete Pelton.

Con la aplicación del recubrimiento en la rueda Pelton, se busca proteger todas las partes expuestas a los efectos abrasivos del agua, las cuales son estrictamente diseñadas para dar una salida específica de esta (cangilón). Allí es donde la eficiencia del rodete es cuantitativa, la cual traducida en términos de porcentaje podemos obtener una máxima carga con menos porcentaje de apertura de los inyectores, por ende, menos consumo de agua. Esta eficiencia se puede ver reflejada en los rodetes con recubrimiento en el tiempo, debido a que a medida que este vaya transcurriendo y las inspecciones se vayan realizando, vamos a poder mantener un perfil hidráulico intacto y el mayor aprovechamiento del caudal disponible en ese momento.

Para hacer tangible la eficiencia del rodete, se obtuvieron de las gráficas arrojadas por el sistema de control y de adquisición (SCADA) de la central, donde se cargaron variables de caudal, potencia y porcentaje de apertura de los inyectores, con estas variables se logró graficar la curva de eficiencia del rodete con recubrimiento donde logramos obtener hasta 2 puntos porcentuales de ganancias en el tiempo, en comparación con el rodete original de la central Amoyá.

La gráfica donde se logró ver la eficiencia del rodete, es aquella donde se gráfica caudal vs potencia, y como eje secundario el ingreso de cada uno de los inyectores (6 inyectores). Como antecedente se tiene que por diseño los rodetes Pelton no son muy eficientes en ciertas potencias (menores), esto se logró ver en la gráfica, pero de igual manera se puede observar que a partir de 4 inyectores abiertos se comienza a ganar eficiencia. Esta información fue sacada de la prueba de eficiencia inicial que realizó el fabricante del recubrimiento y se explicará con mejor detalle en el apartado de Resultados.

5.4 Beneficios de la aplicación del recubrimiento cerámico.

En la industria de la generación de electricidad a base de agua, constantemente se deben realizar reparaciones por soldadura a los rodetes, esto debido en algunos casos al desgaste prematuro por abrasión o cavitación. La reparación por soldadura, según el diámetro del rodete puede oscilar entre 400 y 800 millones de pesos (COP) en centros certificados, como toda reparación, la reparación por soldadura puede traer efectos secundarios a los rodetes, y en un futuro no se le podrán realizar más reparaciones (resistencia mecánica, esfuerzos admisibles etc.). De igual manera el tiempo muerto por no generación elevaría los costos asociados a estas reparaciones.

La aplicación del recubrimiento a un rodete puede oscilar entre 300 y 600 millones de pesos (COP), la ventaja principal radica en que a medida que el tiempo de funcionamiento va aumentando el revestimiento no sufrirá daño alguno (según las condiciones de agua estudiada), por ende, el material base del rodete no debería perder espesores y mejoraría el tiempo de funcionamiento de la central de generación.

Durante la etapa de evaluación del recubrimiento, se deberá entregar un informe evaluativo sobre el desempeño de éste, con el seguimiento de las inspecciones realizadas y anomalías encontradas. De igual forma, se deberá incluir las evaluaciones del aumento de la curva de generación de la central asociada a la disminución de los periodos muertos por mantenimiento y no generación.

6. Resultados y discusión

6.1 Resultados de la caracterización y evaluación de los sólidos que contienen el agua del Rio Amoyá

En la situación a la cual se veía sometido el rodete de origen de la central, a las 10.000 horas (Ver Figura 26) de operación ya se apreciaba desgaste erosivo por abrasión y cavitación., en razón a la alta concentración de sólidos abrasivos presentes en las aguas a turbinar. Según G. Morris “En las ruedas Pelton, la abrasión aumenta rápidamente en función de la cabeza, especialmente por encima de los 400 m, y las ruedas Pelton de cabeza alta pueden desgastarse con cuarzo de 0,05 mm en suspensión ((M.Bouvard, 2017).

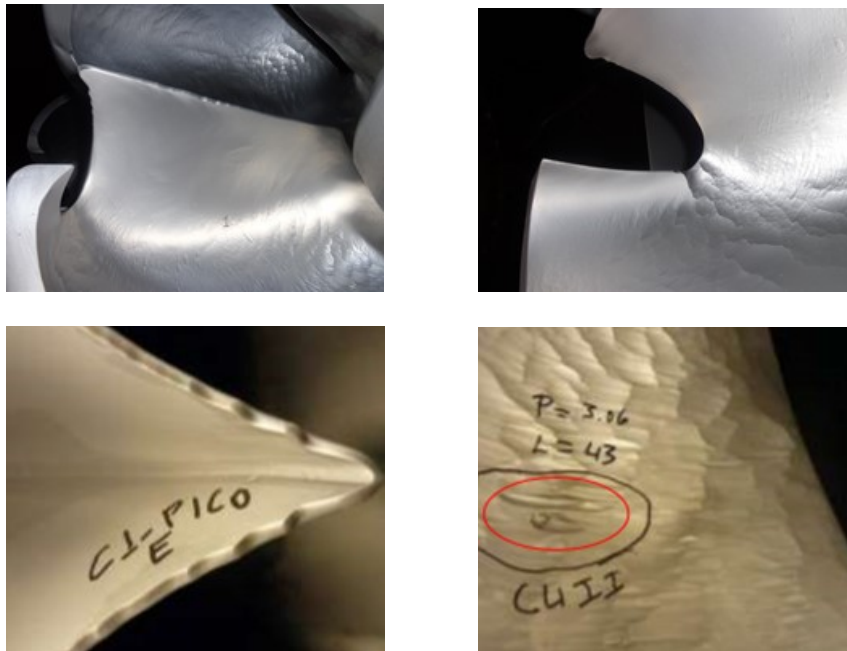


Figura 26. Desgaste rodete de origen a las 10.000 horas.

En la Figura 26 se observa el grado de deterioro que tenía el rodete de origen de la central hidroeléctrica , el cual no contaba con recubrimiento cerámico y estaba sometido al poder abrasivo que contenían las partículas suspendidas en el agua. Se pueden observar daños en los intrados, pico, escotaduras y rizados en el pico por pérdida de la geometría del cangilón ocasionando que la salida del agua no sea homogénea.

Dada la afirmación en el párrafo anterior (Morris), y teniendo presente las características técnicas de la central hidroeléctrica que tiene 512 metros de cabeza, y los resultados que fueron entregados de la caracterización de las aguas turbinadas del Rio Amoyá, donde se encontraron minerales que tienen un tamaño entre 1 y 1000 μ m. (Ver Figura 27. Distribución tamaño de partículas por DRX.), con volúmenes superiores al 5% de la muestra y con minerales como el cuarzo, el feldespato, anfíbol, lepidocrocita etc.

Para dar una mayor ilustración de algunos de los minerales presentes en las muestras, se va dar una breve explicación de las características fisicoquímicas de cada uno:

- CUARZO

Categoría:	Minerales óxidos (antes clasificado dentro de los tectosilicatos)
Brillo:	Vítreo intenso especialmente en cristal de roca, mate en calcedonias.
Color:	Muy variado, los más comunes; blanco, transparente, rojo, gris, violeta, amarillo y rosa.
Densidad:	Cuarzo (a) bajo: 2,6 - 2,65 (Media 2,62 g/cm ³) Cuarzo (b) alto: 2,53 g/cm ³
Transparencia:	Transparente.
Dureza:	7 (duro, raya el vidrio) y menos en las formas criptocristalinas.
Fractura:	Concoidea, con superficies resultantes muy lisas.
Exfoliación:	[0110] Indistintamente.
Tenacidad:	Quebradizo
Sistema Cristalino:	Trigonal
Luminiscencia:	Triboluminiscente
Raya:	Blanca
Otras:	El índice de refracción de 1,55, Fuertemente piezoeléctrico
Clase (Strunz):	4.DA.05
Formula química:	SiO ₂

- FELDESPATOS

Categoría:	Minerales tectosilicatos
Brillo:	Vítreo
Color:	Blancos o incoloros
Densidad:	2,5 – 2.8 g/cm ³
Dureza:	4.5 Mohs.
Exfoliación:	Fácil o perfecta en dos direcciones que forman un ángulo de 90
Sistema Cristalino:	Se presenta en cristales euhdrales, tabulares o prismáticos
Clase (Strunz):	9.FA.30
Formula química:	(K,Na)AlSi ₃ O ₈ (alcalinos) ; albita (KAlSi ₃ O ₈) – anortita (CaAl ₂ Si ₂ O ₈)

- ANFIBOL

Categoría:	Minerales inosilicatos
Brillo:	Vítreo o lechoso
Color:	Negro, verde, amarillo y marrón en tonos fuertes y pálidos.
Densidad:	Menor que los piroxenos
Forma:	Prismático y a menudo con secciones basales en forma de diamante
Dureza:	5 – 6 escala de Mohs
Exfoliación:	De 56° y 124°.
Sistema Cristalino:	Los cristales se ven como columnas cortas de seis caras
Raya:	Blanca
Formula química:	(SiO ₄)

- LEPIDOCROCITA.

Categoría:	Minerales óxidos, Hidróxido
Brillo:	Adamantino, sub-metálico, sedoso
Color:	Rojo oscuro, rojo pardo
Densidad:	3.96 g/cm ³
Transparencia:	Transparente.
Dureza:	5 Mohs
Fractura:	Desigual

Exfoliación:	Perfecta
Tenacidad:	Quebradizo
Sistema Cristalino:	Otorrombico
Raya:	Naranja
Lustre:	Sub-metálico
Clase (Strunz):	4.FE.15
Formula química:	Fe ₃ O(OH)

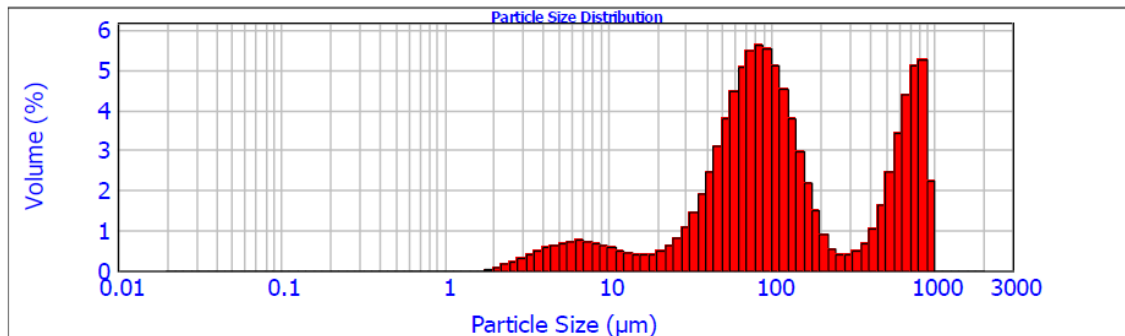


Figura 27. Distribución tamaño de partículas por DRX.

En términos generales y en la totalidad de muestras remitidas al laboratorio, los resultados de las pruebas mineralógicas arrojan evidente predominancia de Cuarzo, Horblenda (Anfíbol), Magnetita y Feldespato, los cuales poseen una dureza de Mohs de 7, 5.5, 6 y 4.5 respectivamente. La prueba DRX identificó la presencia de Hiperstena en proporciones de 5% y 30%. La Hiperstena es un mineral de la categoría de los inosilicatos con dureza de Mohs de 5,5 a 6 y con densidad de 3,55 g/cm³. En la muestra del canal de descarga de las unidades se encontró que por lo menos que el 40% del material, corresponde a cuarzos.

Los resultados de la granulometría para las muestras tomadas en la descarga de las turbinas, permitió identificar la presencia de arenas finas (0.075- 0.42mm) que pueden acelerar la erosión. En cuanto al total de los sólidos suspendidos, el máximo valor alcanzado se logró en el canal de conducción con un total de 735mg/l.

La prueba DRX arrojó información de los minerales más representativos dentro de un rango porcentual (Dominante >50%, Común 15-30%, Presente 5-15%, Trazas TR <5%), permitiendo decir que el Cuarzo es dominante y los Feldespatos son comunes o

presentes, lo cual es un resultado cualitativo. La prueba se complementa con la prueba de Secciones Delgadas y el mayor porcentaje de Cuarzo de las muestras provenientes del Canal de Descarga de las Turbinas de Generación (CDTG) asciende a 63% (ver Tabla 18). No obstante, la prueba de Mineralogía Óptica de Arenas arroja el contenido de un mayor número de minerales presentes en la muestra y es más precisa en los porcentajes, lo cual es importante para la implementación de criterios semi-empíricos para predecir en un futuro, la tasa de desgaste erosivo. Un análisis adicional se presenta en la sección de recomendaciones.

Tabla 18. Características generales del material del Canal de descarga de las turbinas

ANÁLISIS ESTADÍSTICO	TAMAÑO DE PARTÍCULA		RESULTADO DE MINERALOGÍA (%)			
	D50 (mm)	D90 (mm)	CUARZO	FELDESPATO	ANFIBOL	MOSCOVITA
Promedio	0.112	0,189	43,3	33,2	18,4	4,9
Desviación estándar	0.021	0,059	9,4	8,4	5,8	1,9
Máximo	0.160	0,280	63	45	32	10

Fuente: tomada de la información final enviada por el laboratorio.

Otra acción importante realizada para continuar con el análisis en línea de la calidad del agua a turbinar fue la implementación de la toma de muestra de la turbidez del agua, esta es una medida donde el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas suspendidas en el agua. La medición se realiza con la ayuda del cono Imhoff (Ver Figura 28), el cual es un dispositivo que se encuentra ubicado en la zona de captación de la central hidroeléctrica y es manejado por el operador del sitio, este toma cada hora el registro de los sólidos suspendidos que están entrando en el momento a la turbina, y con la medida final que arroje el cono Imhoff, se puede tomar una decisión de sacar de sincronismo las unidades, con el fin de proteger el recubrimiento en los periodos de mayor concentración de sólidos, como lo son las crecientes súbitas del río Amoyá, donde el material arrastrado crece exponencialmente (Ver Figura 29) y pondría en riesgos la estabilidad del recubrimiento cerámico.



Figura 28. Cono Imhoff.

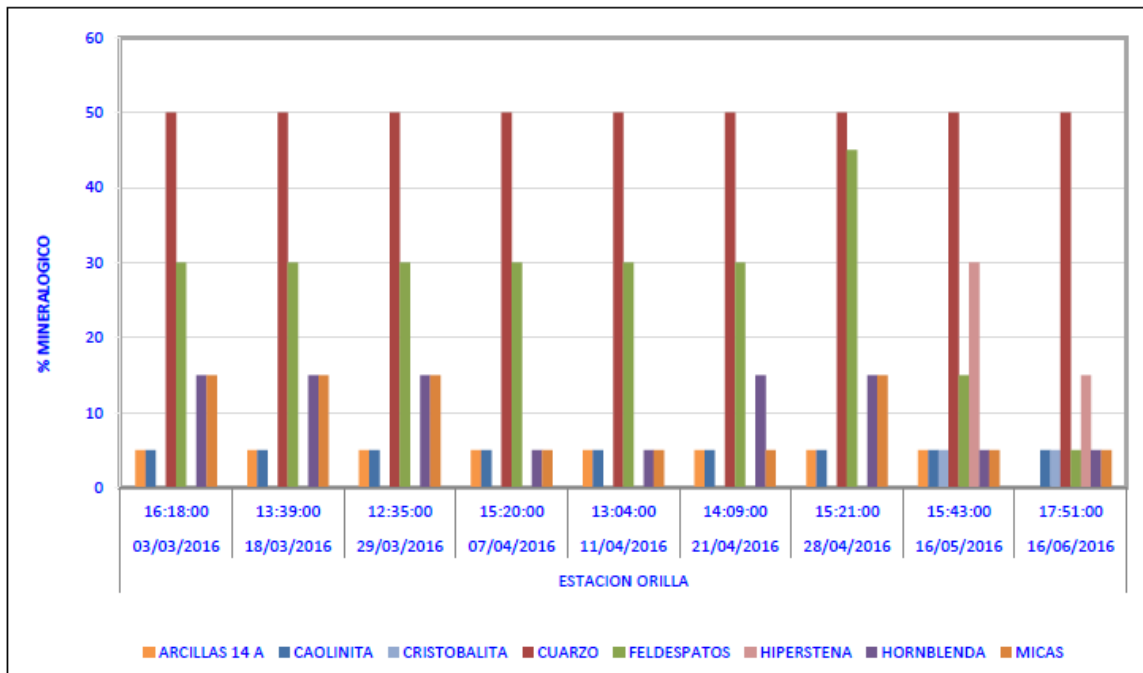


Figura 29. Muestra de ingreso de sólidos de la estación de medición orilla durante diferentes crecientes del río.

6.2 Evaluación y seguimiento al deterioro presentado en el rodete con recubrimiento cerámico.

Los intervalos de inspecciones realizadas están relacionados en la Tabla 4, que se encuentra en el ítem 5.2 y deberán cumplir con estos criterios técnicos:

Los criterios de aceptación al momento de efectuar el control, corresponden al documento de calidad ITP AMOY016A-TUR-0402 B; este documento técnico incluye todas las inspecciones que se deben realizar sobre los cangilones, forma de instalación de las plantillas para realizar la marcación de los puntos, normas aplicables para cada inspección donde indique el criterio mínimo de desgaste del recubrimiento en cada punto del cangilón, de igual forma también da pautas de cómo debe ser entregado el informe por parte de la empresa prestadora del servicio.

Otro documento técnico aplicable para las inspecciones es la norma CCH 70-4 (Especificaciones para la inspección de fundiciones de acero en máquinas hidráulicas.)

El objetivo de estas inspecciones fue detectar a tiempo cualquier tipo de defectos, daños, cambios en el perfil o malas condiciones de operación. Mediante el análisis de los resultados de la inspección y bajo el consejo de un experto, se deberían de planificar y aplicar las acciones correctivas necesarias según el caso.

Las inspecciones se ejecutaron por personal calificado para realizar ensayos no destructivos (MT, UT, PT).

Lista de pruebas no destructivas a ser efectuadas:

- Control visual (dimensional): Consiste en realizar un seguimiento al perfil del cangilón con ayuda de las plantillas que tiene el perfil original.
- Líquidos penetrantes (PT): consiste en la aplicación de tres productos químicos (limpiador, penetrante y revelador), en la zona del cangilón a evaluar, el cual permitirá identificar si existe algún tipo de grieta.
- Partículas magnéticas (MT): Consiste básicamente en magnetizar la pieza y la aplicación de un polvo fino de limaduras de hierro, el cual mostrara si existe algún tipo de defecto en la zona evaluada.

- Ultrasonidos (UT): Se utiliza para caracterizar el espesor de la pieza mediante la aplicación de ondas ultrasónicas de alta frecuencia.
- Pruebas por radiografía (RT): se realiza para generar imágenes de la estructura del cangilón, con el fin de identificar desgastes excesivos.
- Ensayos de balanceo (estático o dinámico): Este ensayo se realiza cuando el rodete tenga una reparación previa, bien sea por aporte de soldadura o daño en algún cangilón que modifique la masa total.
- Control del perfil (plantillas): Consiste en la verificación del perfil hidráulico del cangilón, con ayuda del plantillado manual.
- Control de la dureza del material (dureza): Este ensayo se realiza si el rodete ha sufrido algún tipo de recocido, o tratamiento térmico.
- Control de superficies (rugosidad): Consiste en la verificación del alisado de la superficie de contacto del cangilón con el chorro de agua, lo que ayudara a disminuir que se presente algún tipo de cavitación.
- Control de espesor de *revestimiento* (dimensional): Este ensayo se realiza con ayuda del equipo de medición POSITECTOR 6000 FS1, el cual mide el espesor del recubrimiento cerámico.

El método de prueba a aplicar dependió del tipo de inspección y de las informaciones que se tengan del rodete y su funcionamiento. De manera general dos tipos de inspección se pueden hacer:

Para mantenimiento e inspecciones técnicas de rutina:

- Control visual (dimensional)
- Partículas magnéticas (MT)
- Control del perfil (plantillas).

Para inspecciones de daños:

- Control visual (dimensional)
- Partículas magnéticas (MT)
- Líquidos penetrantes (PT)
- Ultrasonido (UT)

- Control del perfil (plantillas)
- Control de superficies (rugosidad)
- Control de la dureza del material (dureza)
- Control de espesor de *revestimiento* (dimensional).







El día 24 del mes de febrero/2018, se instaló el rodete # 183562 en la U2, sobre este rodete y las inspecciones realizadas es donde se centrará éste estudio:

6.2.1 Inspección por medio de ensayos no destructivos en el periodo t_0 (500 horas de operación)

El objetivo principal de estas revisiones fue determinar el estado de sanidad del rodete instalado en la U2, de igual forma garantizar el correcto funcionamiento del revestimiento bajo las condiciones del agua del Rio Amoyá. (Ver Anexo A para las medidas en mm del recubrimiento)

.Mediciones inspección T_0

Tabla 4. Mediciones en los cangilones.

RODETE N° 183562	Fecha de inspección 2018/04/30	UBICACION DE INDICACIONES
Cangilón 1	Sin inconformidades	
Cangilón 2	Sin inconformidades	
Cangilón 3	Sin inconformidades	
Cangilón 4	Presenta un pequeño daño en la escotadura superior Categorizado como <u>caso 0</u>	 ver fotos 13 y 14
Cangilón 5	Indicación en el pico (falta de recubrimiento y de material base del pico) Categorizado como <u>caso 0</u>	 ver fotos 15 y 16
Cangilón 6	Sin inconformidades	
Cangilón 7	Indicación en el pico (falta de recubrimiento y de material base del pico) Categorizado como <u>caso 0</u>	 ver fotos 17 y 18
Cangilón 8	Sin inconformidades	
Cangilón 9	Sin inconformidades	
Cangilón 10	Indicación en el pico (falta de recubrimiento y de material base del pico) Categorizado como <u>caso 0</u>	 ver fotos 19 y 20
Cangilón 11	Indicación en el pico (falta de recubrimiento y de material base del pico). Categorizado como <u>caso 0</u> pequeño daño en la escotadura superior Categorizado como <u>caso 0</u>	 ver fotos 21 y 22
Cangilón 12	Sin inconformidades	
Cangilón 13	Sin inconformidades	
Cangilón 14	Sin inconformidades	
Cangilón 15	Sin inconformidades	
Cangilón 16	Sin inconformidades	
Cangilón 17	Sin inconformidades	
Cangilón 18	Sin inconformidades	
Cangilón 19	Sin inconformidades	
Cangilón 20	pequeño daño en la escotadura superior Categorizado como <u>caso 0</u>	 ver fotos 23 y 24
Cangilón 21	Sin inconformidades	

Pequeño daño (ver manual de mantenimiento AMOY016A-TUR-0653)

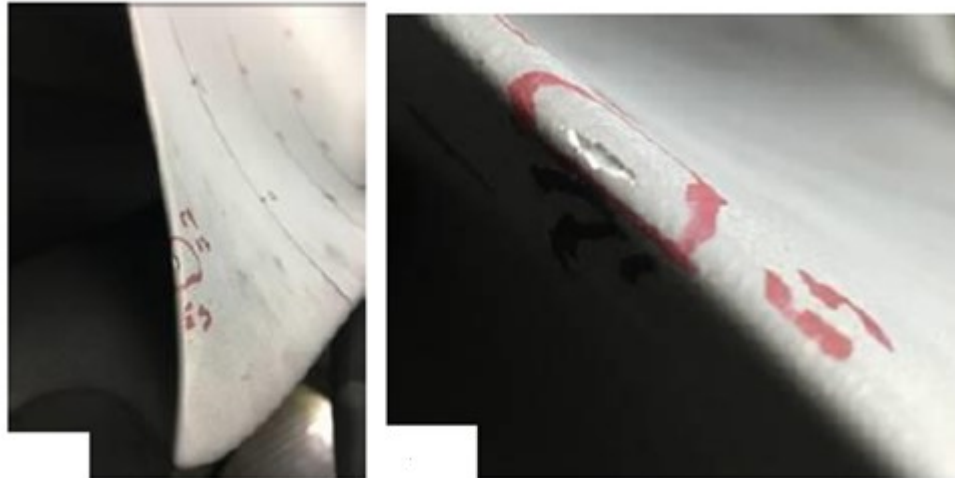


Figura 30. Cangilón 4 con falta de revestimiento intrado superior.

En la figura #30 se observa la falta de recubrimiento encontrado en el cangilón #4 sobre el intrado superior, durante la revisión de las 500 horas de operación.

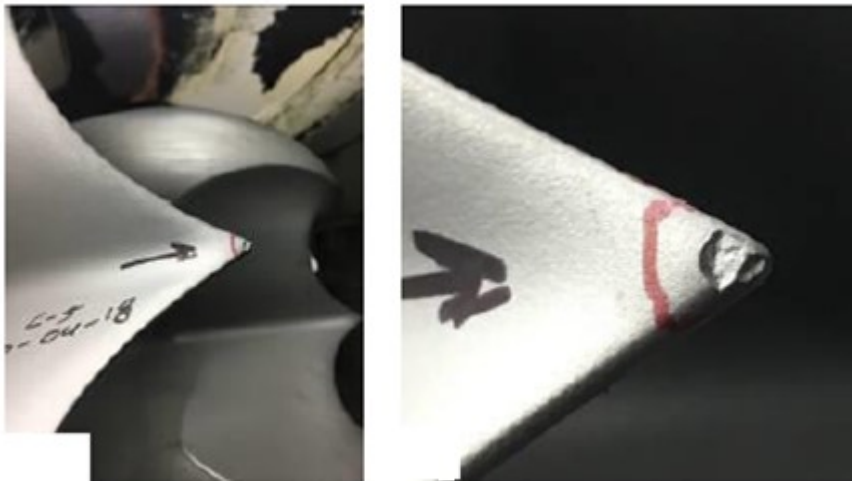


Figura 31. Cangilón 5 con falta de revestimiento en el pico.

En la figura # 31 se observa la falta de revestimiento encontrado en el cangilón # 5 en la parte trasera del pico. En los análisis realizados esto resulto de algún impacto que recibió el cangilón.



Figura 32. Cangilón 10 con falta de revestimiento en el pico.

En la figura # 32 se observa la falta de revestimiento encontrado en el cangilón # 10 en la parte trasera del pico. En los análisis realizados esto resulto de algún impacto que recibió el cangilón.



Figura 33. Cangilón 11 con falta de revestimiento en el pico y en los bordes de las escotaduras.

En la figura # 33 se observa la falta de revestimiento encontrado en el cangilón # 11 en el borde de las escotaduras y el pico. De esta evidencia se dejó el reporte para realizar el debido seguimiento durante la próxima revisión.

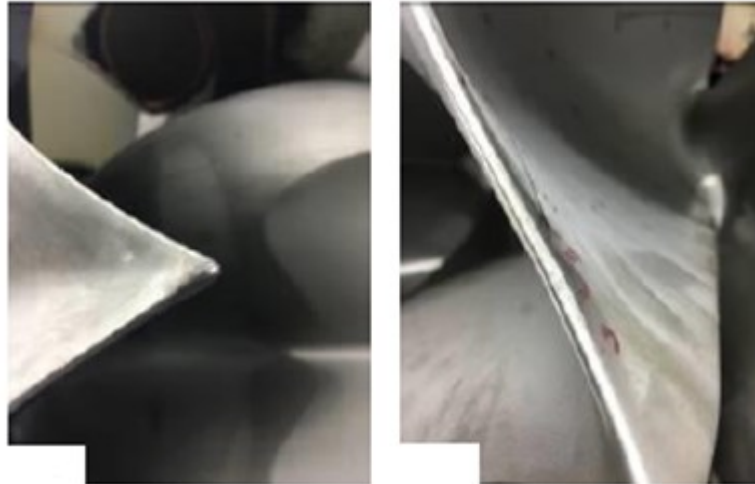


Figura 34. Pico pulido en cangilón 10 y en borde de escotadura cangilón 4.

En la figura # 34 se observa la actividad de pulido que se realizó en el borde de la escotadura del cangilón # 4 y #10, con el fin de evitar avances en el deterioro del recubrimiento.



Figura 35. Inspección con partículas magnéticas en raíz y boquereles.

En la figura # 35 se observa la actividad de inspección por partículas magnéticas en la raíz del cangilón y en los boquereles de los inyectores, con el objetivo de identificar fisuras o grietas.



Figura 36. Medición de revestimientos en rodete y agujas.

En la figura # 36 se observa la medición del espesor del recubrimiento sobre los cangilones y agujas de los inyectores, con ayuda del dispositivo POSITECTOR 6000 FS1

6.2.2 Prueba realizada en el periodo T1 (a las 1500 horas).

Los resultados de la inspección realizada a las 1500 horas de operación se muestran en la Tabla 5 y las medidas de cada revestimiento en las Tablas 30-33 (Ver Anexo B).Tabla5.

Resultados de la inspección en el periodo T1

RODETE N° 183562	Fecha de inspección 2018/05/29	UBICACIÓN DE INDICACIONES
Cangilón 1	Sin inconformidades	
Cangilón 2	Sin inconformidades	
Cangilón 3	Sin inconformidades	
Cangilón 4	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior	 ver fotos 13 y14
Cangilón 5	Despicado en el pico (golpe mecánico) pérdida del recubrimiento y del material base.	 ver fotos 15 y 16
Cangilón 6	Sin inconformidades	
Cangilón 7	Despicado en el pico (golpe mecánico) pérdida del recubrimiento y del material base.	 ver fotos 17 y 18
Cangilón 8	Sin inconformidades	
Cangilón 9	Sin inconformidades	
Cangilón 10	Despicado en el pico (golpe mecánico) pérdida del recubrimiento y del material base.	 ver fotos 19
Cangilón 11	Despicado en el pico (golpe mecánico) pérdida del recubrimiento y del material base. Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior y erosión del material base	 ver fotos 20 a 22
Cangilón 12	Sin inconformidades	
Cangilón 13	Sin inconformidades	
Cangilón 14	Sin inconformidades	
Cangilón 15	Sin inconformidades	
Cangilón 16	Sin inconformidades	
Cangilón 17	Sin inconformidades	
Cangilón 18	Sin inconformidades	
Cangilón 19	Sin inconformidades	
Cangilón 20	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura inferior	 ver fotos 23
Cangilón 21	Sin inconformidades	

○ Pérdida de material base y del recubrimiento cerámico en pico (impacto mecánico)

○ Pérdida del recubrimiento cerámico (por impacto mecánico)

Las imágenes asociadas a la inspección, a la que se hace referencia en la Tabla 5 y los desgastes en los cangilones se pueden observar en el Anexo B.

6.2.3 Prueba de inspección T₂ (a las 4000 horas).

Los resultados para este tiempo se muestran en las Tablas 6 - 7 y el desgaste de la cerámica en cada cangilón en las Tablas 34-37 (Ver Anexo C).

Tabla 6. Resultados de la inspección en el periodo T2




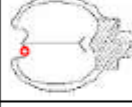
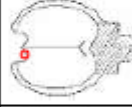



RODETE N° 183562	Fecha de inspección 2018/10/02	UBICACIÓN DE INDICACIONES
Cangilón 1	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior en una longitud de 15 mm	 ver fotos 13 y 14
Cangilón 2	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior en una longitud de 20 mm	 ver fotos 15 y 16
Cangilón 3	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura inferior en una longitud de 12 mm	 ver fotos 17 y 18
Cangilón 4	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior en una longitud de 10 mm	 ver fotos 19 y 20
Cangilón 5	Despicado en el pico (golpe mecánico) pérdida del recubrimiento y del material base, en una longitud de 6 mm	 ver fotos 21 y 22
Cangilón 6	Sin inconformidades	
Cangilón 7	Despicado en el pico (golpe mecánico) pérdida del recubrimiento y del material base, en una longitud de 5 mm	 ver fotos 23 y 24
Cangilón 8	Sin inconformidades	
Cangilón 9	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior e inferior en una longitud de 35 mm y 55 mm respectivamente.	 ver fotos 25 y 26
Cangilón 10	Despicado en el pico (golpe mecánico) pérdida del recubrimiento y del material base, en una longitud de 6 mm	 ver fotos 28 y 29

Tabla 7. Resultados de la inspección en el periodo T2 parte 2.

RODETE N° 183562	Fecha de inspección 2018/10/02	UBICACIÓN DE INDICACIONES
Cangilón 11	Despicado en el pico (golpe mecánico) pérdida del recubrimiento y del material base, en una longitud de 5 mm. Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior en una longitud de 45 mm	 ver fotos 30 a 32
Cangilón 12	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura inferior en una longitud de 6 mm	 ver fotos 33 y 34
Cangilón 13	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura inferior en una longitud de 17 mm	 ver fotos 35 y 36
Cangilón 14	Sin inconformidades	
Cangilón 15	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura inferior en una longitud de 22 mm	 ver fotos 37 y 38
Cangilón 16	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior en una longitud de 5 mm	 ver fotos 39 y 40
Cangilón 17	Sin inconformidades	
Cangilón 18	Sin inconformidades	
Cangilón 19	Sin inconformidades	
Cangilón 20	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura inferior en una longitud de 10 mm	 ver fotos 41
Cangilón 21	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior en una longitud de 10 mm	 ver fotos 42 y 43

Las imágenes asociadas a esta inspección, a las que se hace referencia en las Tablas 6 y 7 se pueden observar en el Anexo C.

6.2.4 Prueba de inspección T3.

Los resultados para este periodo se muestran en las Tablas 8 y 9; y el desgaste de la cerámica en cada cangilón en las Tablas 38-40 (Ver Anexo D).Tabla 8.

Resultados de la inspección en el periodo T3 parte1.























RODETE N° 183562	Fecha de inspección 2018/10/02	UBICACIÓN DE INDICACIONES
Cangilón 9	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 60 mm x 6 mm escotadura inferior 70 mm x 5 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 35 y 36
Cangilón 10	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 50 mm x 4 mm escotadura inferior 35 mm x 3 mm pico 5 mm de diámetro pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 37 a 39
Cangilón 11	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 40 mm x 6 mm escotadura inferior 25 mm x 2 mm pico 4 mm de diámetro pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 40 a 41
Cangilón 12	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 30 mm x 4 mm escotadura inferior 70 mm x 4 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 42 y 43
Cangilón 13	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 25 mm x 4 mm escotadura inferior 35 mm x 4 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 44 y 45
Cangilón 14	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 15 mm x 2 mm escotadura inferior 40 mm x 4 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 46 y 47
Cangilón 15	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 20 mm x 2 mm escotadura inferior 50 mm x 4 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 48
Cangilón 16	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 30 mm x 2 mm escotadura inferior 8 mm x 5 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 49 y 50
Cangilón 9	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 60 mm x 6 mm escotadura inferior 70 mm x 5 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 35 y 36
Cangilón 10	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 50 mm x 4 mm escotadura inferior 35 mm x 3 mm pico 5 mm de diámetro pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 37 a 39
Cangilón 11	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 40 mm x 6 mm escotadura inferior 25 mm x 2 mm pico 4 mm de diámetro pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 40 a 41

Tabla 9. Inspección a tiempo T3 parte 2.

RODETE N° 183562	Fecha de inspección 2018/10/02	UBICACIÓN DE INDICACIONES
Cangilón 11	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 40 mm x 6 mm escotadura inferior 25 mm x 2 mm pico 4 mm de diámetro pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 40 a 41
Cangilón 12	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 30 mm x 4 mm escotadura inferior 70 mm x 4 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 42 y 43
Cangilón 13	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 25 mm x 4 mm escotadura inferior 35 mm x 4 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 44 y 45
Cangilón 14	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 15 mm x 2 mm escotadura inferior 40 mm x 4 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 46 y 47
Cangilón 15	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 20 mm x 2 mm escotadura inferior 50 mm x 4 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 48
Cangilón 16	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 30 mm x 2 mm escotadura inferior 8 mm x 5 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 49 y 50
Cangilón 17	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 25 mm x 3 mm escotadura inferior 40 mm x 3 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 51 y 52
Cangilón 18	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 20 mm x 2 mm escotadura inferior 45 mm x 3 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 53 a 55
Cangilón 19	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 20 mm x 2 mm escotadura inferior 30 mm x 4 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 56 a 57
Cangilón 20	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 35 mm x 3 mm escotadura inferior 25 mm x 3 mm pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 58 a 59
Cangilón 21	Pérdida del recubrimiento en el borde de la escotadura superior 35 mm x 4 mm escotadura inferior 30 mm x 3 mm pico 2 mm de diámetro pequeño daño Categorizado como caso 0	 ver fotos 60 y 61

Las imágenes asociadas a esta inspección, a las que se hace referencia en las Tablas 7, 8 y 9 se pueden observar en el Anexo D.

6.2.5. Inspección T0 rodete sin recubrimiento.

En las tablas 10 y 11 se observa las inconformidades encontradas durante la inspección de las 500 horas de operación al rodete sin recubrimiento.

Tabla 10. Inspección a tiempo T0 parte 1.




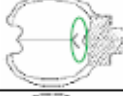
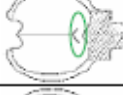


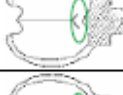







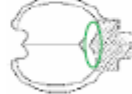
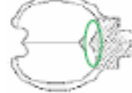



RODETE Nº 92882	Fecha de inspección 2017/02/06	UBICACIÓN DE INDICACIONES
Cangilón 1	Intradós superior e inferior: Presenta una leve erosión en la salida del agua, con L=55 y A=40 dada en Milímetros. Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 2	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 3	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades..	
Cangilón 4	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades..	
Cangilón 5	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 6	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 7	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 8	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 9	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades..	
Cangilón 10	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	

Tabla 11. Inspección a tiempo T0 parte 2.

RODETE N° 92883	Fecha de inspección 2017/04/06	UBICACIÓN DE INDICACIONES
Cangilón 11	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 12	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 13	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 14	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 15	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 16	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 17	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 18	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 19	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	
Cangilón 20	Intradós superior e inferior: leve desgaste raíz: Presenta poros Estrado o dorso: Sin inconformidades.	

6.2.6 Resultados prueba T1 1500 horas de operación.

Para esta prueba se mostraran los resultado del plantillado, de esta manera se lograra evidenciar mejor el grado del deterioro del cangilón desde el tiempo T0 hasta el T1.

Las Tablas 12 y 13 muestran el resultado del plantillado en el intradós del cangilón y el respectivo desgaste comparado con la medida en el tiempo T0.

Tabla 12. Inspección a tiempo T1 cangilón 5.

CANGILON	PLANTILLA	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 04 06	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 06 13	ULTIMO DESGASTE mm
C 5	C1	1.5	3.0	1.5
	C10 S	3.0	3.0	0
	C10 I	2.0	2.0	0
	C11 S	1.0	1.0	0
	C11 I	2.0	2.0	0
	C12 S	1.0	1.0	0
	C12 I	1.0	1.0	0
	C13 S	1.0	1.0	0
	C13 I	1.0	1.0	0
	Pico radial	27.77	28.64	0.87
	Pico tangencial	23.76	24.38	0.62

Tabla 13. Inspección a tiempo T1 cangilón 15.

CANGILON	PLANTILLA	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 04 06	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 06 13	ULTIMO DESGASTE mm
C 15	C1	1.5	3.0	1.2
	C10 S	2.0	3.5	1.5
	C10 I	1.0	2.0	1.0
	C11 S	1.6	2.0	0.4
	C11 I	2.0	2.0	0
	C12 S	1.0	1.0	0
	C12 I	1.0	1.0	0
	C13 S	1.0	1.0	0
	C13 I	1.0	1.0	0
	Pico radial	27.86	28.47	0.61
	Pico tangencial	23.05	23.49	0.44

Las Tablas 14 y 15 muestran el resultado de la medición del borde de los cangilones 5 y 15 y el respectivo desgaste comparado con la medida en el tiempo T0.

Tabla 14. Inspección a tiempo T1 cangilón 5.

CANGILON	BORDE	Valor medido en rodete u2	Espesor o distancia original en el borde*	Desgaste en el borde	Porcentaje de pérdida en el borde
C 5	C10 S	24,8	24,43	0	0,00
	C10 I	23,16	24,43	1,27	5,20
	C11 S	20,5	20,32	0	0,00
	C11 I	18,37	20,32	1,95	9,60
	C12 S	20,5	19,58	0	0,00
	C12 I	18,07	19,58	1,51	7,71
	C13 S	19,86	19,01	0	0,00
	C13 I	18,38	19,01	0,63	3,31
	C8 I	26,92	27,13	0,21	0,77
	C9 I	35,42	35,15	0	0,00
	Pico tangencial	24,38	24,67	0	0,00
	Pico radial	28,64	27,52	1,12	4,07

Tabla 15. Inspección a tiempo T1 cangilón 15.

CANGILON	BORDE	Valor medido en rodete u2	Espesor o distancia original en el borde*	Desgaste en el borde	Porcentaje de pérdida en el borde
C 15	C10 S	22,28	24,43	2,15	8,80
	C10 I	23,37	24,43	1,06	4,34
	C11 S	19,21	20,32	1,11	5,46
	C11 I	19,81	20,32	0,51	2,51
	C12 S	18,9	19,58	0,68	3,47
	C12 I	18,4	19,58	1,18	6,03
	C13 S	18,84	19,01	0,17	0,89
	C13 I	19,15	19,01	0	0,00
	C8 I	26,69	27,13	0,44	1,62
	C9 I	36,7	35,15	0	0,00
	Pico tangencial	23,49	24,67	0	0,00
	Pico radial	28,47	27,52	0,95	3,45

6.2.7 Resultados prueba T2 (4000 horas de operación).

Tabla 16. Inspección a tiempo T2 cangilón 5.

CANGILON	PLANTILLA	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 04 06	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 06 13	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 09 13	ULTIMO DESGASTE mm
C 5	C1	1.5	3.0	8.0	5.0
	C10 S	3.0	3.0	4.0	1.0
	C10 I	2.0	2.0	3.0	1.0
	C11 S	1.0	1.0	2.0	1.0
	C11 I	2.0	2.0	3.0	1.0
	C12 S	1.0	1.0	1.5	0.5
	C12 I	1.0	1.0	2.0	1.0
	C13 S	1.0	1.0	1.5	0.5
	C13 I	1.0	1.0	1.5	0.5
	Pico radial	27.77	28.64	30.15	1.51
Pico tangencial	23.76	24.38	26.73	2.35	

Tabla 17. Inspección a tiempo T2 cangilón 15.

CANGILON	PLANTILLA	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 04 06	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 06 13	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 09 13	ULTIMO DESGASTE mm
C 15	C1	1.5	3.0	7.0	4.0
	C10 S	2.0	3.5	5.0	1.5
	C10 I	1.0	2.0	4.0	2.0
	C11 S	1.6	2.0	2.0	0
	C11 I	2.0	2.0	3.0	1.0
	C12 S	1.0	1.0	1.0	0
	C12 I	1.0	1.0	2.0	1.0
	C13 S	1.0	1.0	1.0	0
	C13 I	1.0	1.0	1.5	0.5
	Pico radial	27.86	28.47	29.73	1.26
	Pico tangencial	23.05	23.49	24.49	1.0

Las tablas 16 y 17 muestran el resultado del plantillado en el intradós del cangilón y el respectivo desgaste comparado con la medida en el tiempo T0 y T1.

Las tablas 18 y 19 muestran el resultado de la medición del borde de los cangilones 5 y 15 y el respectivo desgaste comparado con la medida en el tiempo T0 y T1.

En la Figura 37 se observa la pérdida de material que ha sufrido la arista media del cangilón 5, el cual tiene aproximadamente 8mm.

Tabla 18. Inspección a tiempo T2 cangilón 5.

CANGILON	BORDE	Valor medido en rodete u2	Espesor o distancia original en el borde*	Desgaste en el borde	Porcentaje de pérdida en el borde
C 5	C10 S	24,66	24,43	0	0
	C10 I	22,33	24,43	2,1	8,60
	C11 S	19,80	20,32	0,52	2,56
	C11 I	17,63	20,32	2,69	13,24
	C12 S	19,25	19,58	0,33	1,69
	C12 I	17,50	19,58	2,08	10,62
	C13 S	18,82	19,01	0,19	1,00
	C13 I	17,85	19,01	1,16	6,10
	C8 I	25,54	27,13	1,59	5,86
C9 I	35,15	35,15	0	0,00	

Tabla 19. Inspección a tiempo T2 cangilón 15.

CANGILON	BORDE	Valor medido en rodete u2	Espesor o distancia original en el borde*	Desgaste en el borde	Porcentaje de pérdida en el borde
C 15	C10 S	22,14	24,43	2,29	9,37
	C10 I	23,29	24,43	1,14	4,67
	C11 S	18,97	20,32	1,35	6,64
	C11 I	18,91	20,32	1,41	6,94
	C12 S	18,15	19,58	1,43	7,30
	C12 I	17,97	19,58	1,61	8,22
	C13 S	18,56	19,01	0,45	2,37
	C13 I	17,69	19,01	1,32	6,94
	C8 I	25,08	27,13	2,05	7,56
C9 I	35,66	35,15	0	0	

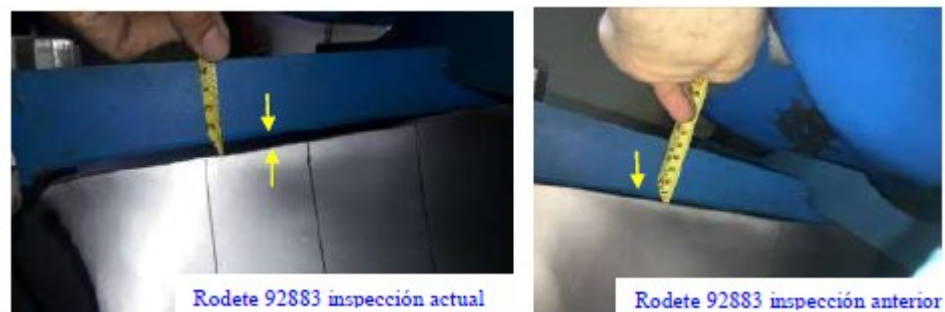


Figura 37. Desgaste Arista media 4000 horas servicio.

6.2.8 Resultados prueba T3 (8000 horas de operación).

Tabla 20. Inspección a tiempo T3 cangilón 5.

CANGILON	PLANTILLA	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 04 06	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 06 13	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 09 13	VALOR MEDIDAS EN mm 2018 02 13	VALOR MEDIDAS EN mm 2018 07 31	ULTIMO DESGASTE mm
C 5	C1	1.5	3.0	8.0	8.0	10.0	2
	C10 S	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	0
	C10 I	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0	0
	C11 S	1.0	1.0	2.0	2.5	2.85	0.35
	C11 I	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0	0
	C12 S	1.0	1.0	1.5	2.5	2.85	0.35
	C12 I	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	0
	C13 S	1.0	1.0	1.5	2.0	3.60	1.60
	C13 I	1.0	1.0	1.5	2.0	2.0	0
	Pico radial	27.77	28.64	30.15	31.50	32.00	0.50
Pico tangencial	23.76	24.38	26.73	26.89	26.89	0	

Tabla 21. Inspección a tiempo T3 cangilón 15.

CANGILON	PLANTILLA	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 04 06	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 06 13	VALOR MEDIDAS EN mm 2017 09 13	VALOR MEDIDAS EN mm 2018 02 13	VALOR MEDIDAS EN mm 2018 07 31	ULTIMO DESGASTE mm
C 15	C1	1.5	3.0	7.0	7.0	10.0	3
	C10 S	2.0	3.5	5.0	5.0	5.0	0
	C10 I	1.0	2.0	4.0	5.0	5.0	0
	C11 S	1.6	2.0	2.0	3.0	3.30	0.30
	C11 I	2.0	2.0	3.0	4.0	4.0	0
	C12 S	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	0
	C12 I	1.0	1.0	2.0	2.5	2.5	0
	C13 S	1.0	1.0	1.0	1.0	1.84	0.84
	C13 I	1.0	1.0	1.5	2.0	2.0	0
	Pico radial	27.86	28.47	29.73	31.90	32.5	0.60
Pico tangencial	23.05	23.49	24.49	24.60	24.60	0	

Las tablas 20 y 21 muestran el resultado del plantillado en el intradós del cangilón y el respectivo desgaste comparado con la medida en el tiempo T0, T1 y T2.

Las tablas 22 y 23 muestran el resultado de la medición del borde de los cangilones 5 y 15 y el respectivo desgaste comparado con la medida en el tiempo T0, T1 y T2.

Como análisis de las inspecciones realizadas en los intervalos de tiempo definidos, se observa como la pérdida del material en el borde seguía en aumento, alcanzando valores hasta de 22.22 mm. Este fenómeno de desgaste se da por la pérdida del perfil hidráulico del cangilón, inicialmente la pérdida se da en la arista media que es allí donde se da el

primer impacto del chorro para luego ser dirigido hacia los intrados, si no tenemos una superficie homogénea (lisa) para la salida del agua, se producirá una distorsión hidráulica y por ende un desgaste del sustrato. Como sugerencia realizada por los inspectores y debido al desgaste avanzado del rodete, se recomendó en el informe 18-001H01-IG25, realizar a corto plazo la programación de una reparación por recargue de soldadura, amolado y posterior alisado, con el fin de mejorar la eficiencia de la turbina y su vida útil.

Tabla 22. Inspección a tiempo T3 cangilón 5.

CANGILON	BORDE	Valor medido en rodete 92883	Espesor o distancia original en el borde*	Desgaste en el borde	%Porcentaje de pérdida en el borde con respecto a los valores iniciales
C 5	C10 S	23.40	24,43	1.03	4.40
	C10 I	21.50	24,43	2.93	11.99
	C11 S	17.85	20,32	2.47	12.15
	C11 I	15.80	20,32	4.52	22.24
	C12 S	17.20	19,58	2.38	12.15
	C12 I	15.00	19,58	4.58	23.39
	C13 S	16.10	19,01	2.91	15.30
	C13 I	15.00	19,01	4.01	21.09
	C8 I	23.90	27,13	3.23	11.90
	C9 I	32.00	35,15	3.15	8.96

Tabla 23. Inspección a tiempo T3 cangilón 15.

CANGILON	BORDE	Valor medido en rodete 92883	Espesor o distancia original en el borde*	Desgaste en el borde	%Porcentaje de pérdida en el borde con respecto a los valores iniciales
C 15	C10 S	19.00	24,43	5.43	22.22
	C10 I	20.00	24,43	4.43	18.13
	C11 S	16.45	20,32	3.87	19.04
	C11 I	16.50	20,32	3.82	18.79
	C12 S	16.30	19,58	3.28	16.75
	C12 I	16.50	19,58	3.08	15.73
	C13 S	16.20	19,01	2.81	14.78
	C13 I	15.20	19,01	3.81	20.04
	C8 I	23.60	27,13	3.53	13.01
	C9 I	34,15	35,15	1.00	2.84

6.3 Análisis del desgaste ocurrido en el rodete sin recubrimiento vs el rodete con aplicación de recubrimiento a base de carburo de tungsteno.

Para realizar esta comparación, se utilizaron algunas imágenes realizadas en las diferentes inspecciones, que contengan en promedio las mismas horas de operación.

La comparación del grado de deterioro se realizó con el rodete # 92882 instalado el 22 marzo de 2015.

El análisis del desgaste de ambos rodetes se comienza a producir alrededor de las 1500 horas de servicio, por este motivo iniciamos la comparación con la inspección realizada a las 2000 horas de operación.

Para términos de desarrollar mejor el texto, usaremos las siguientes denominaciones:

Rodete 1: rodete sin recubrimiento

Rodete 2: rodete con recubrimiento cerámico.

6.3.1 Primera comparación realizada a las 2000h.

Resultados de la inspección:

En la Figura 38 se observa el promedio de desgaste en los dos cangilones medidos durante la inspección (cangilón 5 y cangilón 15) del rodete 1. Esta Figura a su vez está dividida en a), b) y c) las cuales corresponden a lo siguiente:

a): porcentaje (%) del desgaste medido en el borde de los cangilones 5 y 15.

b) y c): Muestran el desgaste medido (mm) en los intradoses de los cangilones 5 y 15.

En la Figura 39 se observa el plantillado en la zona del intradós y la arista media del cangilón, donde se logró observar una pérdida de material considerable en ambas partes.

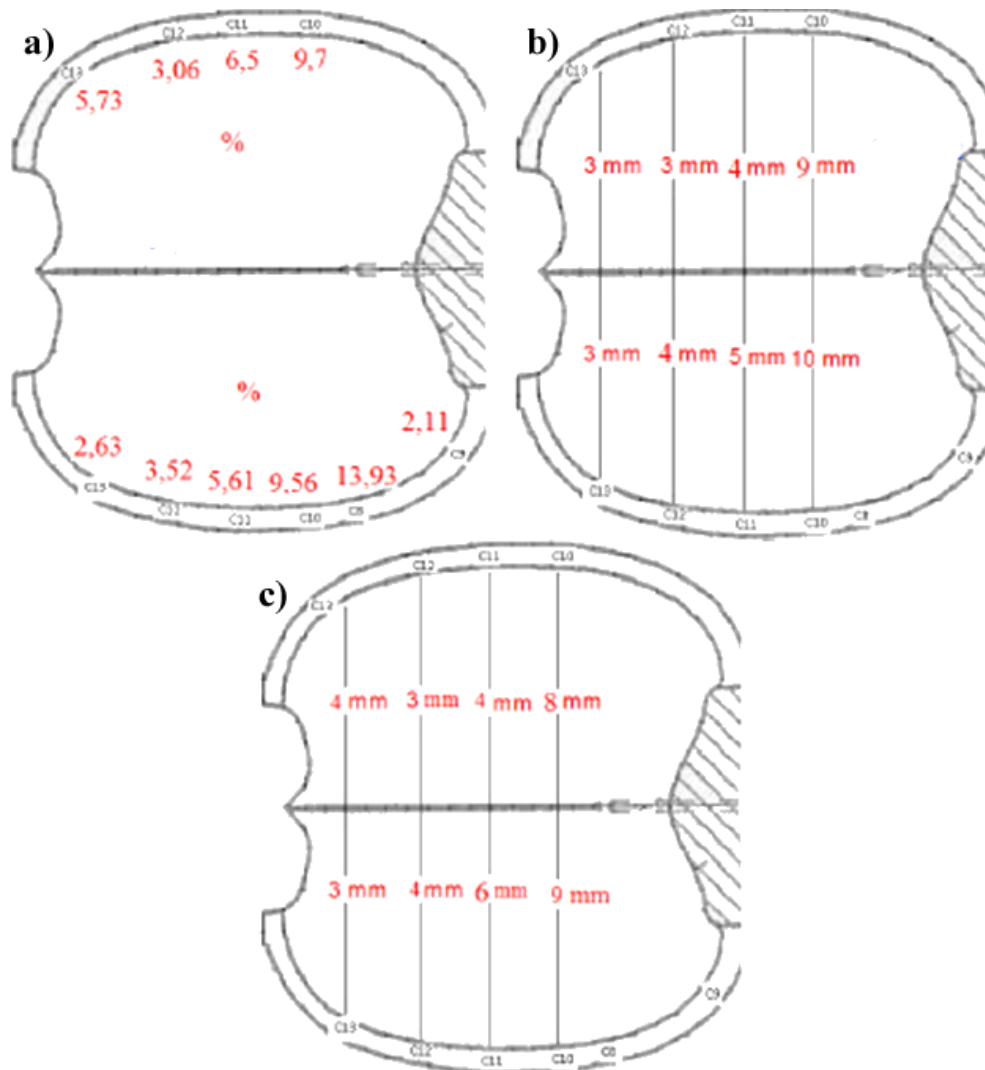


Figura 38. Promedio de la medición del desgaste en dos cangilones en la zona del borde y los intradosos.



Figura 39. Registro plantillado.

6.3.2 Inspección realizada en el periodo T_2 (a las 4000 horas de operación)

En la Figura 40 se observa el promedio de desgaste en los dos cangilones medidos durante la inspección (cangilón 5 y cangilón 15) del rodete 1. Esta Figura a su vez está dividida en a), b) y c), las cuales corresponden a lo siguiente:

a): porcentaje (%) del desgaste medido en el borde de los cangilones 5 y 15.

b) y c): Muestran el desgaste medido (mm) en los intradoses de los cangilones 5 y 15.

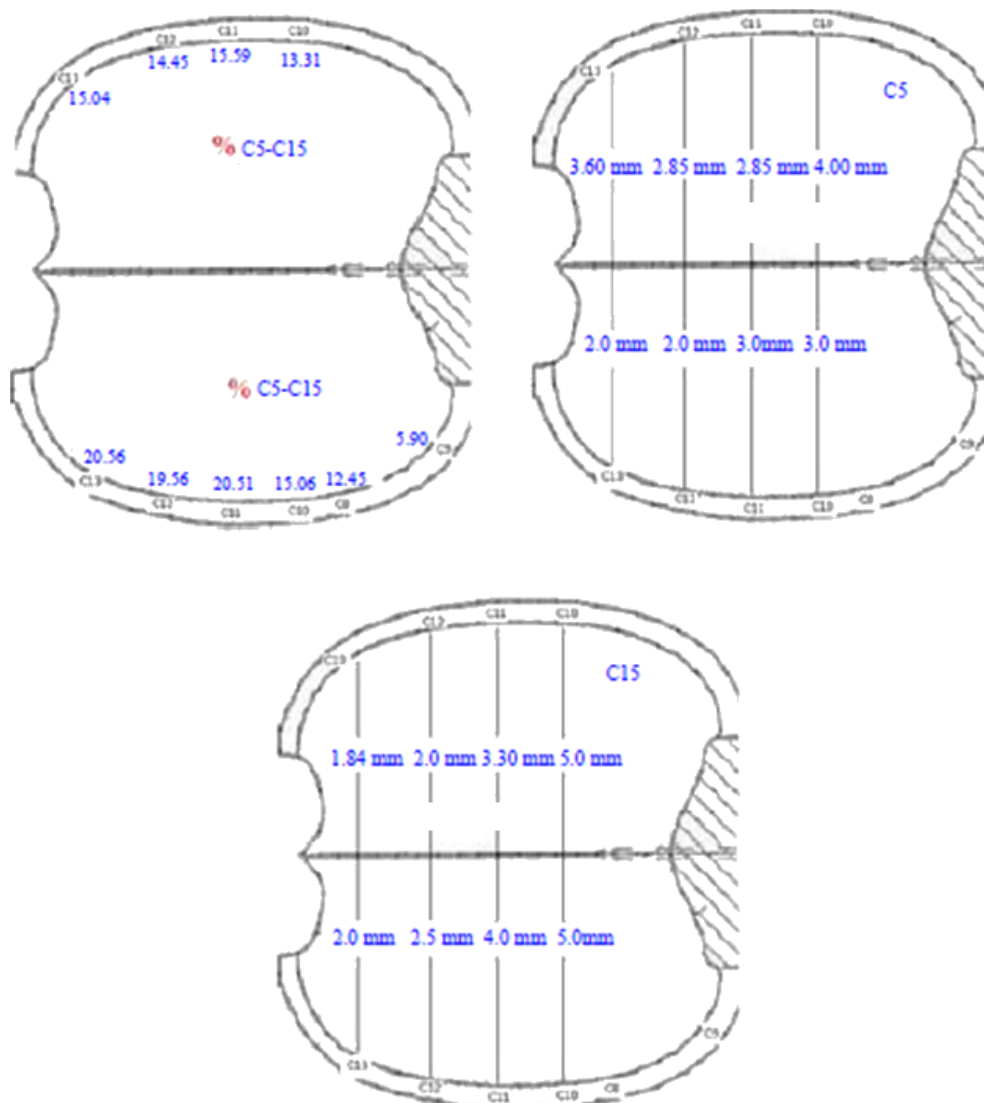


Figura 40. Promedio del desgaste en dos cangilones en el borde y los intradoses

En la Figura 41 se observan las evidencias encontradas en los cangilones 12,13, 15, y 19 donde se puede ver arranque del material con profundidades hasta 15mm, a 4000 horas de operación. Algunos de los defectos son poros, cavitación y abrasión excesiva.



Figura 41. Desgaste avanzado en cangilones.

La descripción de las marcas que tiene los diferentes cangilones son las siguientes:

C: cangilón

R: Numero del rodete inspeccionado

P: Profundidad del defecto encontrado.

L: Longitud del defecto encontrado.

A: ancho del defecto encontrado.

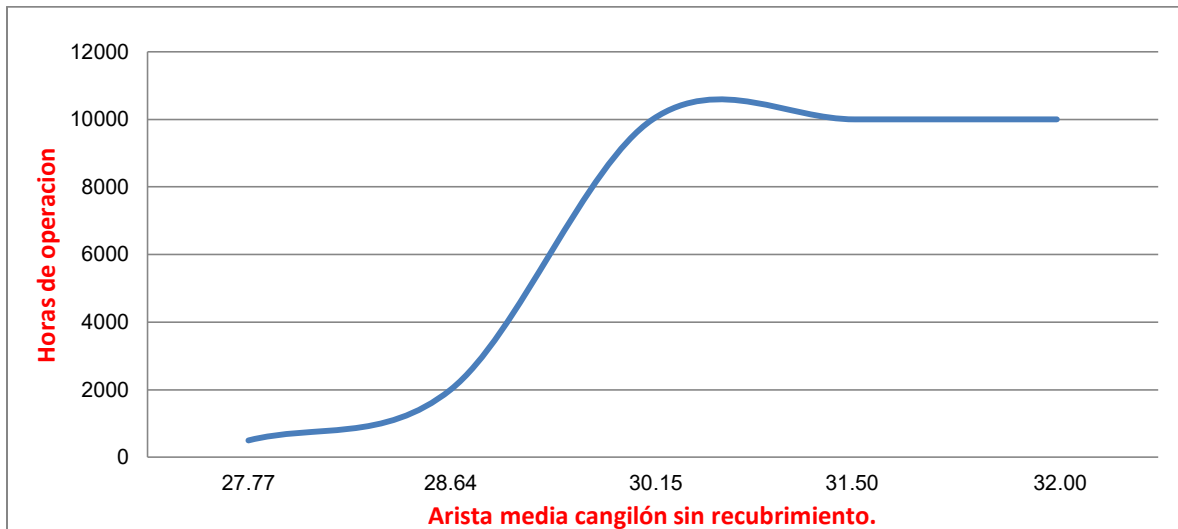


Figura 42. Desgaste de la arista.

En la figura 42 se observa la gráfica que contiene datos sobre el desgaste (mm) al que estaba sometido la arista media del cangilón, se llegaron a encontrar pérdidas de material hasta por 32mm, motivo por el cual ya se había perdido la geométrica de la arista media y su función inicial, la cual es partir el chorro en dos partes iguales para posteriormente ser distribuido en los intrados. Debido a esta distorsión del chorro el desgaste en los intradós era desigual, lo que ayudaba en la disminución de la eficiencia.

En la Figura 43, se observa el comportamiento del recubrimiento durante las diferentes inspecciones que se han realizado. Las plantillas utilizadas (Q2, Q3, Q4), las cuales hacen referencia a la zona de la arista media del cangilón, lugar donde el chorro realiza el primer impacto después de que sale del inyector, identificamos que el comportamiento es el esperado, incluso el desgaste del espesor del recubrimiento es mínimo (0.0025mm) a las 4000 horas de operación, indicando esto que el sustrato del cangilón aún no está siendo sometido a ningún tipo de desgaste.

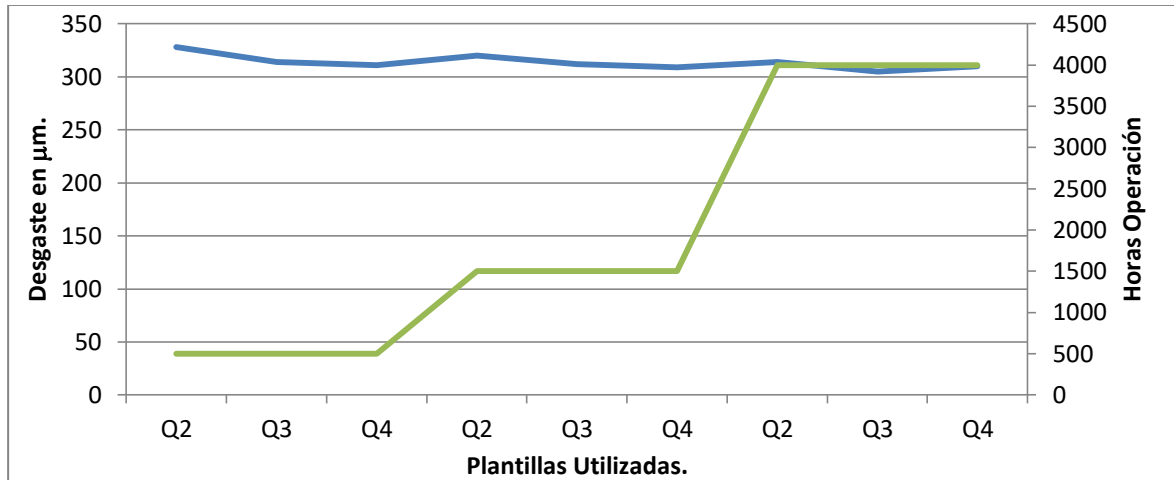


Figura 43. Desgaste del revestimiento.

6.4 Valoración de la mejora de eficiencia con la instalación del rodete con recubrimiento

La característica principal del desgaste al cual se veía sometido el rodete, (abrasión por erosión) es la pérdida de eficiencia, debido a la rápida distorsión del perfil hidráulico original y su geometría haciendo necesario turbinar un caudal mayor de agua para obtener una potencia determinada.

En esta comparación el objetivo principal es mostrar el comportamiento de los rodetes con y sin recubrimiento cerámico frente al consumo de agua y la potencia generada, por ello las variables que se toman para hacer el análisis son la potencia, caudal turbinado y horas de servicio de cada rodete. La franja de comparación de potencias, donde se pueden tener las variables utilizadas para esta comparación oscila entre 19,6 MW y 41,7MW.

La evaluación de la eficiencia en las turbinas Pelton conlleva en la determinación de varios parámetros, de los cuales el caudal es el más importante, es allí donde gana importancia la geometría del perfil hidráulico del cangilón y que se mantengan los ángulos de salida del agua en perfectas condiciones, y alcanzar unos zona libres de cavitación y abrasión, este fue el resultado obtenido con la aplicación del recubrimiento cerámico. A continuación se presenta la prueba de eficiencia realizada a la turbina Pelton.

En la Figura 44 se observa el comportamiento en cuatro puntos diferentes de eficiencia de la turbina Pelton, con sus respectivas potencias y el rango de caudal disponible. La eficiencia máxima obtenida es aproximadamente 91,5%, con 5 inyectores abiertos, consumiendo 7,5m³/s y logrando una potencia entre 29 y 33 MW, si la turbina se mantiene en este punto de la curva se aprovechara el máximo potencial disponible, no obstante al ser una central de filo de agua, y las características técnicas que esto implica, la pérdida de porcentaje en eficiencia varía aproximadamente 0,3%, lo que significa que la turbina se mantendrá con una eficiencia por encima del 91% en todo el rango de caudal disponible. Con estos resultados y la protección que brinda el recubrimiento al perfil hidráulico del cangilón, la central hidroeléctrica aumentó la producción de energía.

RIO AMOYA

Prueba Eficiencia Termodinámica

Turbina Nro. 2

04-06 abril 2018

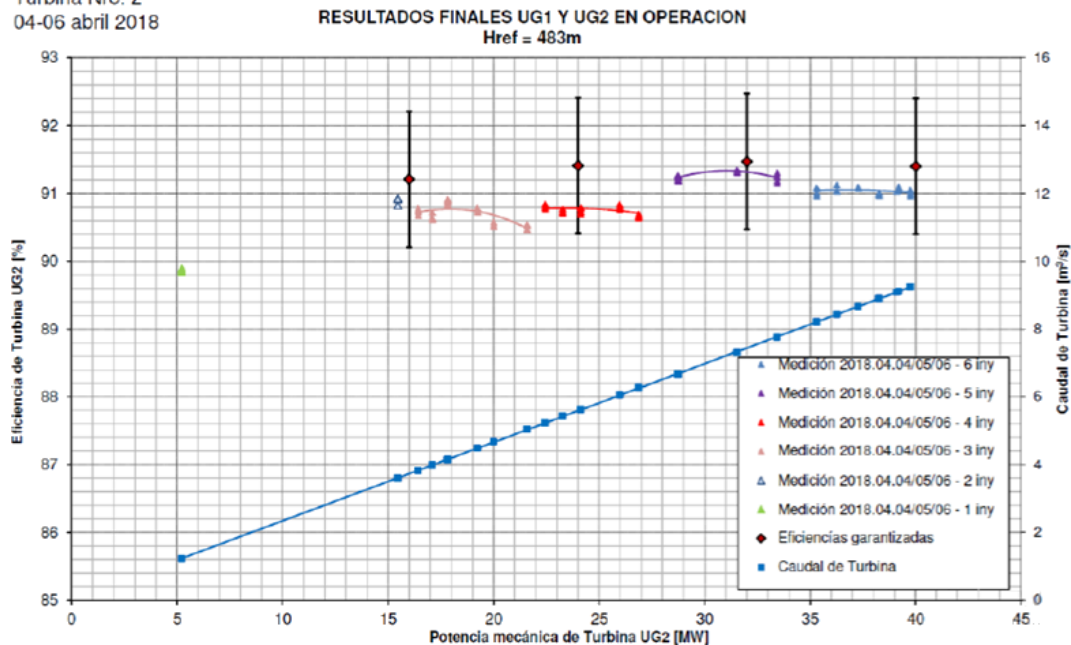


Figura 44. Eficiencia comparativa rodete con recubrimiento.

Leyenda del gráfico:

- ▲ Medición con 5 inyectores abiertos.
- ▲ Medición con 3 inyectores abiertos.
- ▲ Medición con 6 inyectores abiertos.
- ▲ Medición con 2 inyectores abiertos.
- ▲ Medición con 4 inyectores abiertos.
- ◆ Eficiencia garantizada.
- Caudal de turbina.

Para realizar la comparación del consumo de agua de ambos rodetes (rodete 1 y rodete 2), se generaron reportes del sistema de control y adquisición (SCADA) de la central hidroeléctrica, en un rango de tiempo específico para ambos rodetes (potencia y caudal), con el objetivo de graficar estas variables y garantizar la efectividad de la aplicación del recubrimiento y su permanencia en el tiempo.

En la Figura 45 se observa el comportamiento del consumo de agua (caudal) según la potencia a generar que tienen el rodete sin recubrimiento (línea azul) y el rodete con recubrimiento (línea morada). Como resultado global tenemos que el rodete con recubrimiento necesita menos agua para generar una potencia específica, garantizando con esto que se va dar un aprovechamiento mejor al recurso disponible, esto debido a que no se pierde el perfil hidráulico por la protección del revestimiento. Mostrando nuevamente como se hace efectiva la instalación del recubrimiento en todo el rango de potencia a generar.

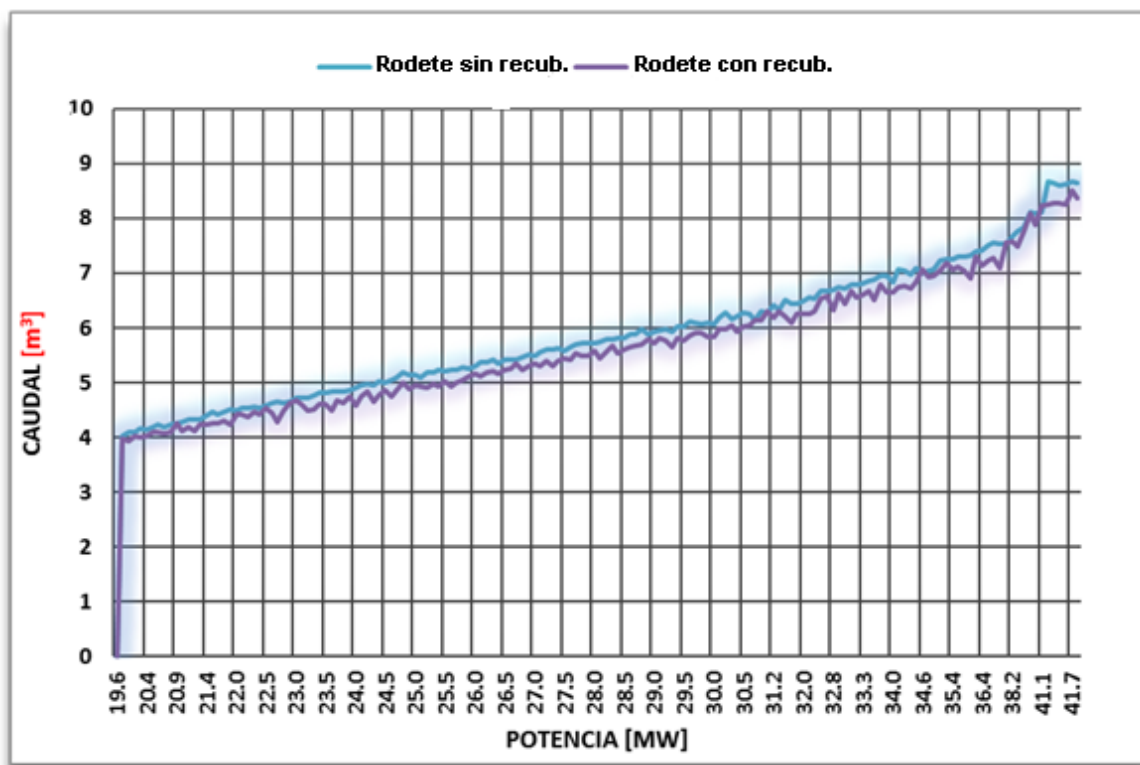


Figura 45. Comparación de potencia rodete sin recubrimiento vs. con recubrimiento.

6.5 Evaluación de costo-beneficio de la aplicación del recubrimiento cerámico

En el estudio técnico-económico de la propuesta de aplicación del recubrimiento cerámico al rodete, contra la opción de enviar a reparar por soldadura el rodete cada vez que se presentara una disminución en los espesores de cangilón mayor al 25%, representaba que aproximadamente cada 10.000 horas se debería tener presupuestado dentro de los egresos de la central, cerca de 340 millones de pesos, para realizar esta reparación. De igual manera se debería incluir el dinero que no se recibiría por la energía no generada, por paradas no programadas y pérdida de eficiencia. En algunos casos se logró identificar pérdidas de 14,7 MW/h. El valor de la aplicación del recubrimiento cerámico a un rodete con un diámetro de 2,422 m es de aproximadamente 550 millones de pesos; con esta inversión se logró una tasa de retorno en aproximadamente 9,5 meses, esto debido a la ganancia en eficiencia que se obtenía en términos de potencia y consumo de agua y se incrementó la disponibilidad en 120 horas al año, debido al no desmontaje del rodete por pérdida del perfil hidráulico.

La central hidroeléctrica Amoyá, cuenta con dos unidades de generación con una capacidad instalada de 80MW. Se cuenta con un rodete de repuesto para suplir la necesidad de realizar un mantenimiento de alguno de los dos rodetes. El tiempo de duración que se puede gastar un proveedor en la reparación por recargue de soldadura de un rodete es aproximadamente 6 meses, esto debido a que es un proceso muy manual, que requiere desbaste, aplicación, control de temperatura, alivio de cargas y pulido del perfil final. La aplicación del recubrimiento al rodete tarda aproximadamente 1 mes adicional.

La ampliación en el tiempo de entrega, se vio recompensado en que durante casi aproximadamente 3 años, no se tuvo la necesidad de desmontar el rodete, para realizar algún tipo de reparación, los tiempos de ejecución de las inspecciones se vieron en la necesidad de ser reprogramadas, por ende el costo asociado a estas, que fueron aproximadamente 150 millones de pesos, fue destinado a satisfacer otras necesidades de la planta, como lo fue la compra de herramienta, capacitaciones técnicas para el personal de mantenimiento, compra de repuestos, etc.

Los costos asociados al mantenimiento de un rodete sin recubrimiento, están asociados inicialmente a inspecciones cada 4 meses, para determinar si se presenta algún tipo de desgaste prematuro, luego de identificar alguna pérdida en la eficiencia, se realiza seguimiento a la pérdida de perfil hidráulico por la abrasión. En la Tabla 24 se observan los costos asociados a 3 días de mantenimiento en diferentes años para inspección del rodete, de igual manera se observa como el porcentaje por pérdida de eficiencia afecta directamente la rentabilidad de la operación año tras año. Donde los costos asociados totales por 9 días son 873 millones de pesos aproximadamente.

Tabla 24: Costos de la operación y mantenimiento de un rodete sin recubrimiento.

COSTOS OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO RODETE SIN RECUBRIMIENTO								
AÑO	PÉRDIDA DE EFICIENCIA	ENERGIA NO GENERADA (MW/h)	COSTO ENERGIA NO GENERADA	COSTO X MANO OBRA DIA	COSTO REPARACION POR SOLDADURA	COSTO DIA	COSTO X DURACION PARADA	COSTO TOTAL PARADA
2015	0,02	0,87	4.591.304,35	308.000	0	4.899.304,35	14.697.913	19.597.217
2016	0,04	1,74	9.182.608,70	308.000	340.000.000	9.490.608,70	75.924.870	425.415.478
2017	0,01	0,43	2.295.652,17	308.000	0	2.603.652,17	20.829.217	23.432.870
2018	0,03	1,30	6.886.956,52	308.000	340.000.000	7.194.956,52	57.559.652	404.754.609
GASTO TOTAL								873.200.173,91

Variables	
Valor hora mano obra propia	23.000
Valor hora mano obra subcontratada	7800
Valor KW/h	220

Tabla 25: Costos operación y mantenimiento de un rodete con recubrimiento.

COSTOS OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO RODETE CON RECUBRIMIENTO							
AÑO	PÉRDIDA DE EFICIENCIA	ENERGIA GENERADA (MW/h)	COSTO ENERGIA GENERADA	COSTO X MANO OBRA DIA	COSTO APLICACIÓN RECUBRIMIENTO	COSTO X DURACION PARADA	UTILIDAD TOTAL
2018	0	40	268.800.000	349000	550.000.000	1.047.000	282.247.000
2019	0	40	268.800.000	349000	0	1.047.000	267.753.000
2020	0	40	268.800.000	349000	0	1.047.000	267.753.000
GASTO TOTAL							253.259.000

Variables	
Valor hora mano obra propia	26.000
Valor hora mano obra subcontratada	8900
Valor KW/h	280

En la Tabla 25 se presentan los costos asociados a la operación y mantenimiento de un rodete con recubrimiento, en la cual se cuenta con las mismas variables, donde los costos asociados totales de los 9 días de mantenimiento durante los 3 años, son

aproximadamente 253 millones de pesos, observando que la reducción de costos es muy significativa y genera un tiempo de retorno a corto plazo.

7. Conclusiones y recomendaciones.

7.1 Conclusiones

Los materiales utilizados para la fabricación de rodetes en las centrales hidráulicas deben ser materiales compuestos, con agregados como el wolframio, cromo níquel, molibdeno etc. Estas aleaciones se utilizan con el fin de incrementar principalmente la dureza de los cangilones y garantizar el buen funcionamiento cuando están expuestos a diferentes fuerzas producidas por el impacto del chorro y la fuerza centrífuga. En los análisis de tensiones que se realizan en software de CFD y elementos finitos, los resultados arrojan que los intradós son la parte del cangilón que mayor tensión reciben durante el primer impacto del chorro.

Para las centrales de tipo filo de agua donde las características del río impactarán considerablemente y se generarán desgastes mucho mayores asociados a la velocidad y a la cabeza que se necesitan para los rodetes tipo Pelton, deberá ser una prioridad técnica la caracterización inicial de la cuenca donde va ser construida la central de generación eléctrica, con el fin de realizar proyecciones seguras y análisis confiables del comportamiento del desgaste al cual será sometido el rodete. El análisis del presente caso de estudio donde para mitigar el desgaste prematuro y pérdida de eficiencia en la generación de energía, se hizo un estudio integral sobre el tipo de sólidos suspendidos que contenía el agua, entregando como resultado parámetros más confiables y el tipo de minerales que contenía el agua, su dureza y porcentaje de presencia en las diferentes trayectos desde la zona de captación hasta la descarga de la turbina. Con estos nuevos parámetros se logró encontrar un recubrimiento cerámico que soportara mecánica y físicamente estos efectos como lo es el SXH-80, aplicado con el procedimiento HVOF.

El deterioro al que se venía sometiendo el rodete sin recubrimiento, dio un margen de maniobra muy corto en el momento de entrada en operación de la central, llevando a tomar decisiones en ese momento que ayudaron a contener el desgaste prematuro, como lo fue inicialmente el alisado de la superficie para intentar mejorar la salida del agua, realizar constantemente pruebas END y finalmente la reparación por recargue de soldadura.

La aplicación del recubrimiento SHX-80 a los cangilones detuvo el desgaste abrasivo prematuro, aumento los tiempos de disponibilidad y durante las cuatro inspecciones que se han realizado hasta el momento no se ha encontrado algún tipo de daño al espesor del recubrimiento superior a 0.0075mm. La aplicación del recubrimiento ha dado un margen de maniobra mucho más amplio para la generación de energía en la central hidroeléctrica, donde se ha logrado generar con una carga mayor de sólidos en el agua convirtiéndose quizás en el punto de mayor ganancia del proyecto, el cual ha representado una mayor disponibilidad en el TBI empresarial para la central, pasando de una disponibilidad anual de 87,8% a 91,2%.

Por lo general el límite máximo de que se tenía anteriormente de sólidos suspendidos en el agua era de 0,2 ml/l, este dato es arrojado por el cono imhoff el cual es un valor en línea del agua que se estaba turbinando en ese momento y allí se decidía sacar las máquinas de sincronismo porque el agua no era apta para generar y se aceleraba el desgaste del rodete. Con la aplicación del recubrimiento cerámico se aumentó el límite para sacar de sincronismo las unidades de generación a un valor máximo de 0,4ml/l, dándose un aprovechamiento mayor del recurso disponible para generar energía y por ende el crecimiento de la generación mensual de la planta en aproximadamente 6%.

La eficiencia de 91,6% que se ha logrado mantener en el tiempo que lleva instalado el rodete con recubrimiento, aumentó los ingresos costo/operacional de la central hidroeléctrica, esto debido a un rendimiento mayor del caudal disponible en el río aún durante las diferentes épocas del año (invierno y verano), donde las pérdidas de potencia que se tenían con el rodete sin recubrimiento eran cerca de 14,7MW/h, los cuales se sumaron a la generación mensual de la planta. En algunos casos como lo fueron en el mes de enero donde se presenta una disminución del caudal natural del río por la entrada de la temporada de verano, se pasó de 20,1 GWh/mes a 23,8GWh/mes.

La alta resistencia al desgaste que presenta este recubrimiento, ha llevado a ampliar los plazos de intervenciones mayores, aumentando la disponibilidad de la planta y la vida útil del activo.

De igual forma se puede afirmar que los recubrimientos de carburo de tungsteno por HVOF aplicados en los rodets de la central Amoyá, se han comportado satisfactoriamente como método de atenuación de los desgastes abrasivos de que son objeto, protegiendo las partes de la turbina con un mayor tiempo en operación, debido a las pocas veces en que se tienen que sacar las unidades de sincronismo por crecientes súbitas del río. Este tipo de recubrimiento puede ser aplicable a otros equipos y componentes de turbo maquinaria, debido al fácil manejo del equipo y su traslado “in situ”.

7.2 Recomendaciones

La experiencia en general puede arrojar que para próximas construcciones de centrales hidroeléctricas tipo filo de agua, que por su disminución en los efectos ambientales que se tienen son llamadas a reemplazar las obsoletas centrales de embalse que por su vida útil ya están llamadas a desaparecer. Es necesario, por tanto realizar un estudio prematuro y caracterización de las aguas a turbinar, con el fin de proporcionar datos idóneos, los cuales servirán como insumo principal para la caracterización, diseño y fabricación de todos los componentes principales de la turbo máquina y de esta manera tener un panorama más amplio de oportunidades de mejora futura, que lograrán ser intervenidas desde el nacimiento de la central aportando a reducir inversiones venideras que afecten la relación-costo beneficio del activo.

8. Bibliografía

- Agüero, A. (octubre de 2007). Recubrimientos contra la corrosión a alta temperatura para componentes de turbinas de gas. *Revista de metalurgia*, 43(5), 384-398.
- Alibaba.com. (s.f.). *Cabeza de agua de energía hidroeléctrica de planta hidro generador de agua de turbina pelton*. Recuperado el 10 de 9 de 2019, de https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-water-head-hydro-power-plant-hydro-generator-water-generator-pelton-turbine-423448834.html?spm=a2700.md_es_ES.deiletai6.1.7bcd29e5dJc0zd
- Andritz. (2017). *Principales productos Mecánicos y Eléctricos fabricados* . Obtenido de <https://www.andritz.com/hydro-en/about-andritz-hydro/locations/morelia-mexico/es/productos>
- Andritz. (2017). *proces technologies, equipment, plants, an systems*. Obtenido de <https://www.andritz.com/hydro-en/hydronews/hn-europe/high-head-turbines/video-turbine-pelton>
- Bedoya , J., Cinca, N., & Guilemanuy, J. (2013). Recubrimientos micro/nanoestructurados de aleaciones ligeras mediante proyección fría para protección y reparación de componentes de elevado valor añadido. *Metalurgia*, 49(3), 223-236.
- Borja Galmés , B. (2015). *Motores de reacción y turbinas de gas*. Madrid España: Ediciones paranifo S.A.
- Ciencia Bosco . (7 de 6 de 2018). *La energía hidráulica*. Recuperado el 10 de 9 de 2019, de <https://cienciabosco.blogspot.com/2018/06/la-energia-la-energia-hidraulica.html>
- Diaz, R. (2009). Comparativo de proyecciones térmicas HVOF y esprayado por plasma para recubrimientos cerámicos.
- Direct Industry. (2009). *Salon online de la industria*. Obtenido de [317a786366364e7249336c4e567162494d785475614b77386c4c7651686c32656b6c414c312b6a6b5776733d](https://www.directindustry.com/317a786366364e7249336c4e567162494d785475614b77386c4c7651686c32656b6c414c312b6a6b5776733d)
- El Tiempo . (2017). Obtenido de <https://www.eltiempo.com/>
- Endesa educa. (2014). *Centrales hidroeléctricas*. Obtenido de Endesa educa: https://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xi.-las-centrales-hidroelectricas

- ENULA. (2016). *Energía nuclear*. Recuperado el 10 de 08 de 2019, de Energía hidroeléctrica: <http://enula.org/2018/01/rosatom-firma-un-contrato-para-la-instalacion-de-facilidades-mini-hidroelectricas-en-la-republica-de-sudafrica/>
- Faeitch. (28 de 02 de 2012). *Turbinas pelton*. Obtenido de <https://faeitch2012.wordpress.com/2012/02/28/turbinas-pelton/>
- García, A., & Monasterio, N. (2018). Tema 7: Rotura y fallo mecánico de los materiales. En a. M. Romero, & N. M. Guisasola, *introducción a la ciencia de los materiales y sus propiedades I*. universidad de palis vasco.
- Gomez, M. P. (Febrero de 2009). *ocw.ehu.eus*. Obtenido de https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/6771/mod_resource/content/1/maquinas_fluidos/tema-6-turbinas-pelton.pdf
- ISAGEN. (2017). la central hidroeléctrica río Amoyáa filo de agua no causa daño al medio ambiente.
- Jimenez, P., & Gatica, N. (2002). Técnica de la demodulación en el diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias. *universidad austral de Chile*, 1-98.
- Mujal Rojas, R. (202). *Electromecánica*. barcelona : UPC.
- OCEUPE. (2020). *Centro europeo de postgrado*. Obtenido de Diseño de una central hidroeléctrica : <https://www.ceupe.com/blog/disenio-de-una-central-hidroelectrica.html>
- Olarte, w., Botero, M., & Cañon, B. (2010). Análisis de vibraciones: una herramienta clave en el mantenimiento predictivo. *Scientia et Technica*, 219-222.
- Sánchez, C. (06 de 2016). Desgaste de máquinas hidráulicas en la generación hidroeléctrica. *colinnovacion*, 1(5).
- Sanz Osorio, J. (2008). *Energías renovables. Energía Hidroeléctrica*. Zaragoza España : Prensas universitarias de Zaragoza.
- Sobolev, V., Guilemany, J., & Calero, J. (1995). Interacción térmica recubrimiento-substrato en la proyección a alta velocidad (HVOF) de partículas (polvo) de WC-Co. *Metalurgia*, 156-165.
- Studylib.es. (s.f.). Obtenido de definicion ceramicos : <https://studylib.es/doc/4482687/definicion-ceramicos>.
- Suescún Monsalve, I. (2013). Turbinas hidráulicas. *Universidad de Antioquia*, 1-19.
- SULZER. (Julio de 2016). *centro de servicios Sulzer en houston*. Recuperado el 8 de Agosto de 2019, de somos su aliado de servicios con soluciones innovadoras :

https://www.sulzer.com/-/media/files/services/service-centers/brochures/houston-service-center_en_e10412_7_2016_web.ashx?la=es-es

Textos científicos. (julio de 2006). *CERÁMICAS Y RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS PARA MEJORAR LA RESISTENCIA AL DESGASTE Y A LA ABRASIÓN.*

Obtenido de Textos científicos:

<https://www.textoscientificos.com/quimica/ceramicas-avanzadas/recubrimientos-ceramicos>

Universidad Nacional de Asunción. (2011). *Generalidades sobre las máquinas hidráulicas*.

Recuperado el 2019, de Altura de salto hidráulico en turbinas :

http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/mh-class04-2011.pdf

universidad EIA. (2019). *Material sobre bombas y turbinas*. Obtenido de Fluidos:

http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/ejercicioh/art%C3%ADculo_mh.html

Universidad Nacional Experimental del Táchira. (2005). *unidad IV*. Obtenido de

Fenómenos de transporte : http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-164.htm

Universidad Popular del Cesar. (2017). *Detección de cavitación en turbinas Francis*.

Recuperado el 2019, de

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2632/31091-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Anexo A: Mediciones en cangilones de inspección T₀.

Tabla 26. Cangilón 4 medidas en micras.

	Q2	Q3	Q4
1	346	328	308
2	322	346	350
3	254	312	314
4	380	286	326
5	320	338	358
6	264	404	340
7	334	282	344
8	384	332	244
9	436	360	308
10	274	318	250
11	322	216	320
12	302	288	304
13	--	320	314
14	--	274	282

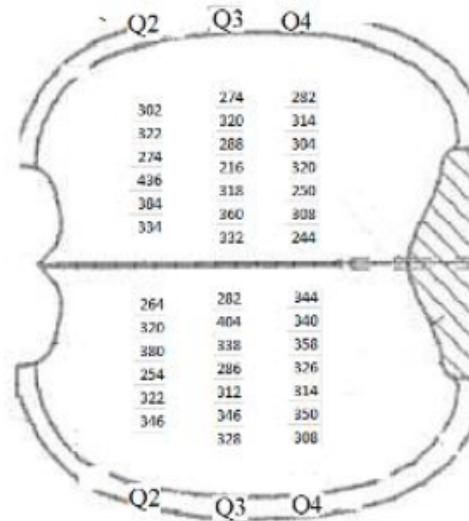


Tabla 27. Cangilón 7 medidas en micras.

	Q2	Q3	Q4
1	250	290	310
2	300	290	318
3	284	316	310
4	346	346	384
5	314	292	320
6	322	320	310
7	340	378	576
8	280	338	270
9	332	298	276
10	276	302	360
11	284	316	218
12	264	316	316
13	---	286	264
14	---	332	292



Tabla 28. Cangilón 11 medidas en micras.

	Q2	Q3	Q4
1	298	328	324
2	306	338	268
3	300	316	296
4	334	318	306
5	300	326	264
6	324	374	310
7	430	410	516
8	284	340	258
9	398	334	170
10	310	320	372
11	330	304	322
12	288	314	280
13	--	341	304
14	--	306	310

Tabla 29. Cangilón 17 medidas en micras.

	Q2	Q3	Q4
1	270	314	308
2	270	312	352
3	226	298	274
4	342	306	328
5	274	318	318
6	304	336	300
7	354	342	430
8	340	340	294
9	441	320	306
10	270	366	388
11	318	322	292
12	266	270	292
13	--	314	350
14	--	272	306

Anexo B: Registro fotográfico y mediciones en cangilones de inspección T₁.



Figura 46. Falta de recubrimiento en el cangilón 5.



Figura 47. Falta recubrimiento cangilon 11.



Figura 48. Falta recubrimiento cangilon 7.



Figura 49. Falta de recubrimiento en el pico de los cangilones 10 y 11.

Tabla 30. Cangilón 4 medidas en micras.

	Q2	Q3	Q4
1	364	338	316
2	322	340	370
3	282	328	334
4	396	297	338
5	324	326	374
6	292	416	356
7	310	316	394
8	362	312	282
9	432	360	334
10	322	340	340
11	310	294	362
12	304	300	302
13	--	314	324
14	--	268	278

Tabla 31. Cangilón 7 medidas en micras.

	Q2	Q3	Q4
1	270	296	320
2	302	314	314
3	332	316	310
4	352	338	380
5	392	288	324
6	334	330	342
7	332	364	440
8	298	332	310
9	366	336	298
10	314	320	384
11	300	344	314
12	288	334	348
13	--	290	312
14	--	330	306

Tabla 32. Cangilón 11 medidas en micras.

	Q2	Q3	Q4
1	308	340	328
2	338	352	296
3	270	334	302
4	372	342	318
5	360	334	278
6	294	382	398
7	408	420	506
8	386	360	330
9	336	352	282
10	308	326	336
11	310	328	302
12	332	336	296
13	--	328	308
14	--	324	294

Tabla 33. Cangilón 17 medidas en micras.

	Q2	Q3	Q4
1	306	336	322
2	281	314	334
3	298	294	298
4	374	308	326
5	342	336	314
6	326	338	328
7	422	352	436
8	364	346	378
9	282	332	364
10	284	374	404
11	288	284	286
12	314	308	332
13	--	310	364
14	--	304	306

Anexo C Registro fotográfico y mediciones en cangilones de inspección T₂.



Figura 50. Falta de recubrimiento en el cangilón 1.

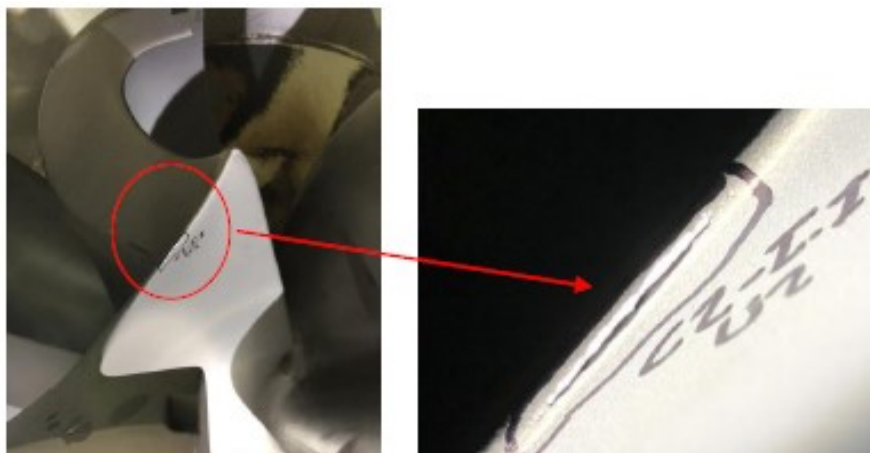


Figura 51. Falta de recubrimiento en el cangilón 2.

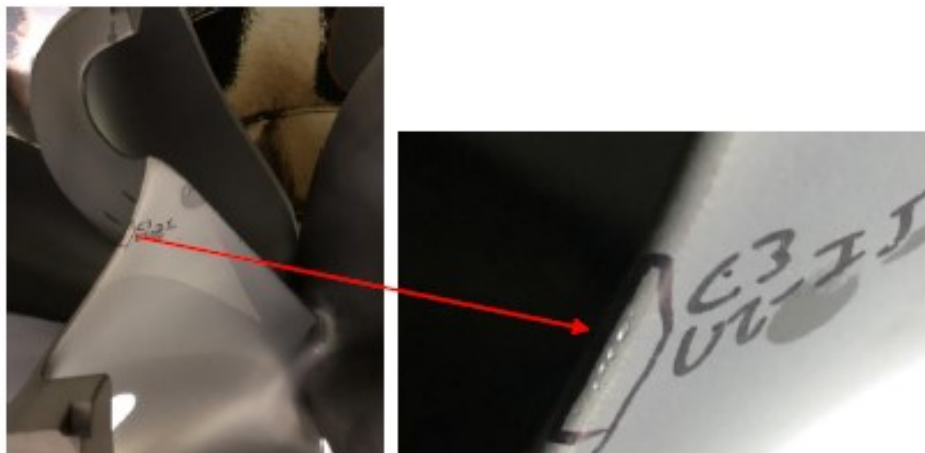


Figura 52. Falta de recubrimiento en el cangilón 3.

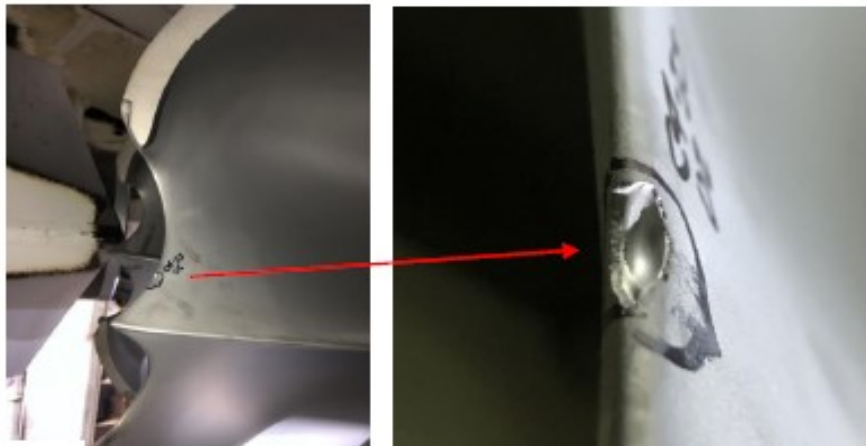


Figura 53. Falta de recubrimiento en el cangilón 5.

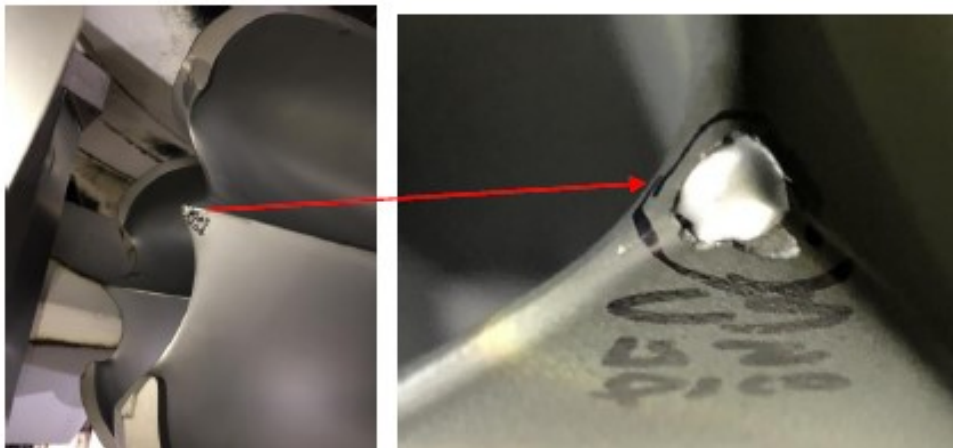


Figura 54. Falta de recubrimiento en el cangilón 5.

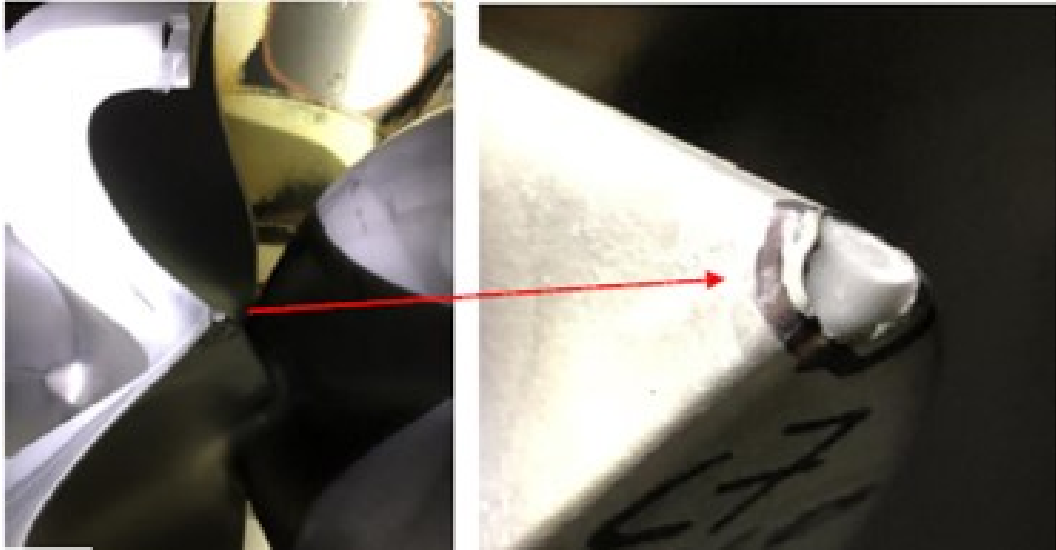


Figura 55. Falta de recubrimiento en el cangilón 7.

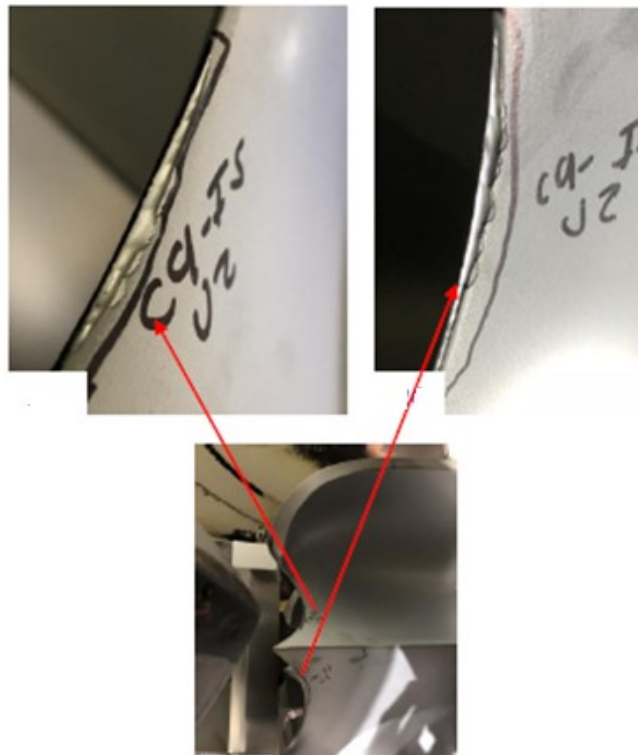


Figura 56. Falta de recubrimiento y desgaste en la escotadura en el cangilón 9.

	Q2	Q3	Q4
1	260	284	312
2	280	292	316
3	272	310	294
4	299	330	358
5	298	270	316
6	292	318	322
7	320	360	458
8	296	336	286
9	322	326	274
10	264	280	366
11	270	312	202
12	254	320	320
13	---	238	290
14	---	298	292

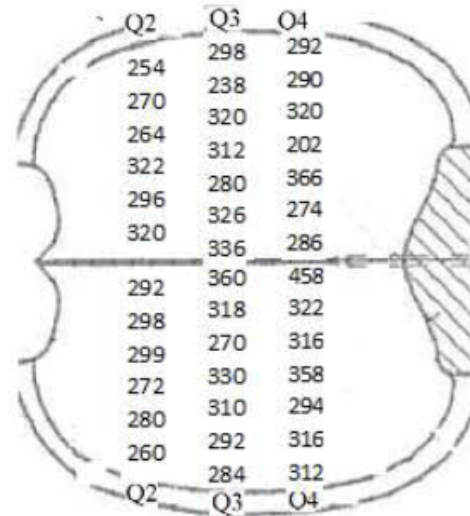


Tabla 36. Cangilón 11 medidas en micras.

	Q2	Q3	Q4
1	296	318	304
2	318	326	276
3	290	310	274
4	348	314	310
5	388	334	292
6	304	372	320
7	440	404	510
8	298	338	250
9	480	322	270
10	322	326	336
11	334	302	299
12	298	306	284
13	---	332	308
14	---	305	309

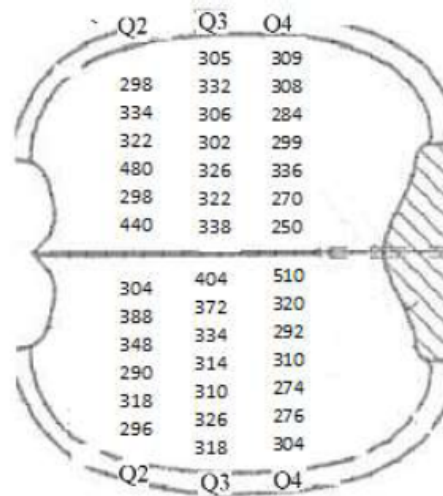
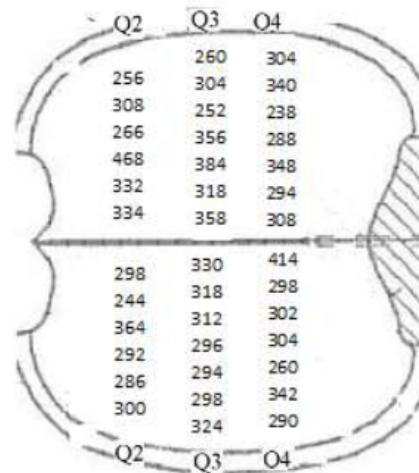


Tabla 37. Cangilón 17 medidas en micras.

	Q2	Q3	Q4
1	300	324	290
2	286	298	342
3	292	294	260
4	364	296	304
5	244	312	302
6	298	318	298
7	334	330	414
8	332	358	308
9	468	318	294
10	266	384	348
11	308	356	288
12	256	252	238
13	---	304	340
14	---	260	304



Anexo D. Registro fotográfico y mediciones en cangilones de inspección T₃

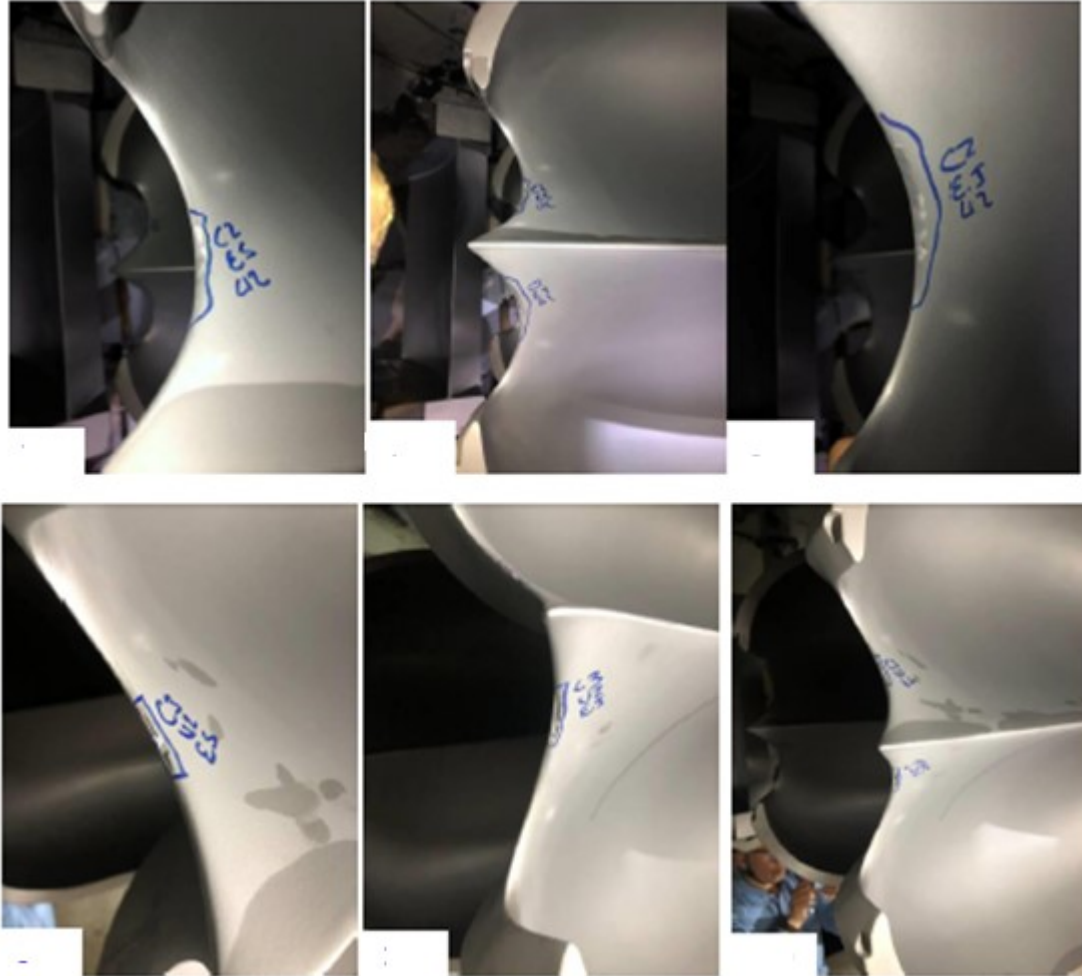


Figura 58. Falta recubrimiento cangilon 2 y 3.

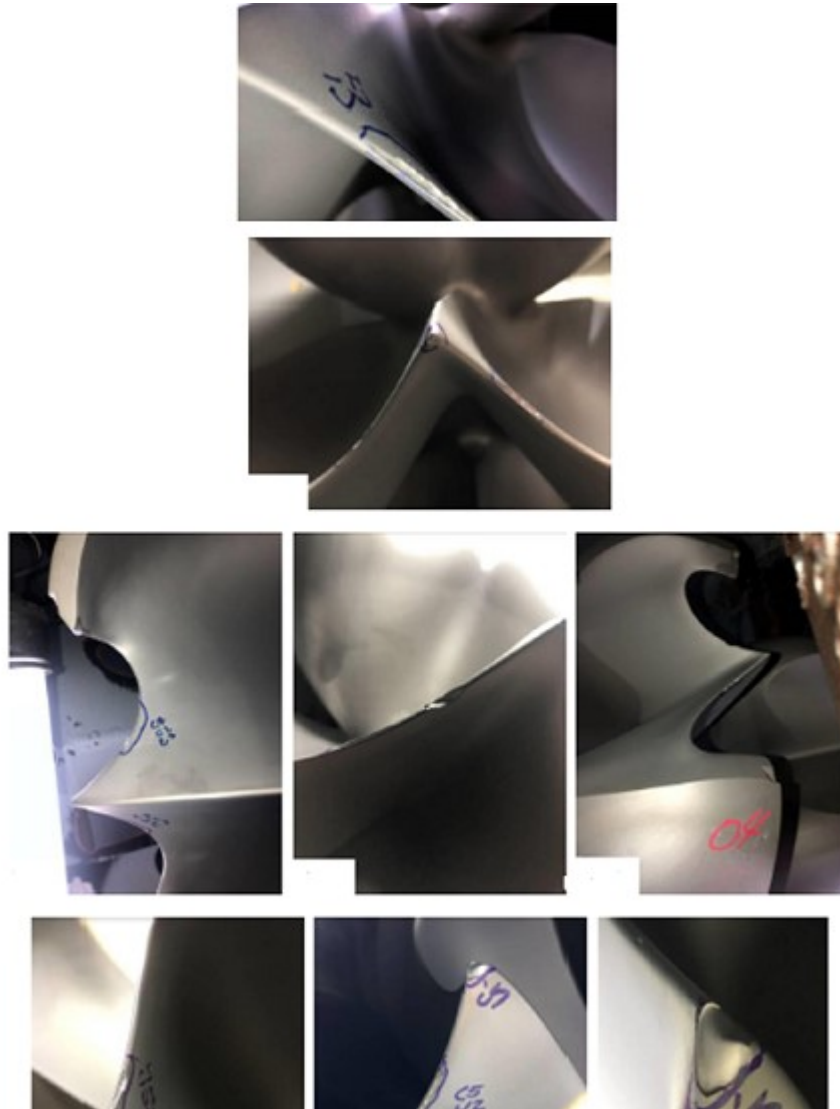


Figura 59. Falta recubrimiento cangilon 4 y 5.



Figura 60. Falta de recubrimiento cangilon 6 y 7.

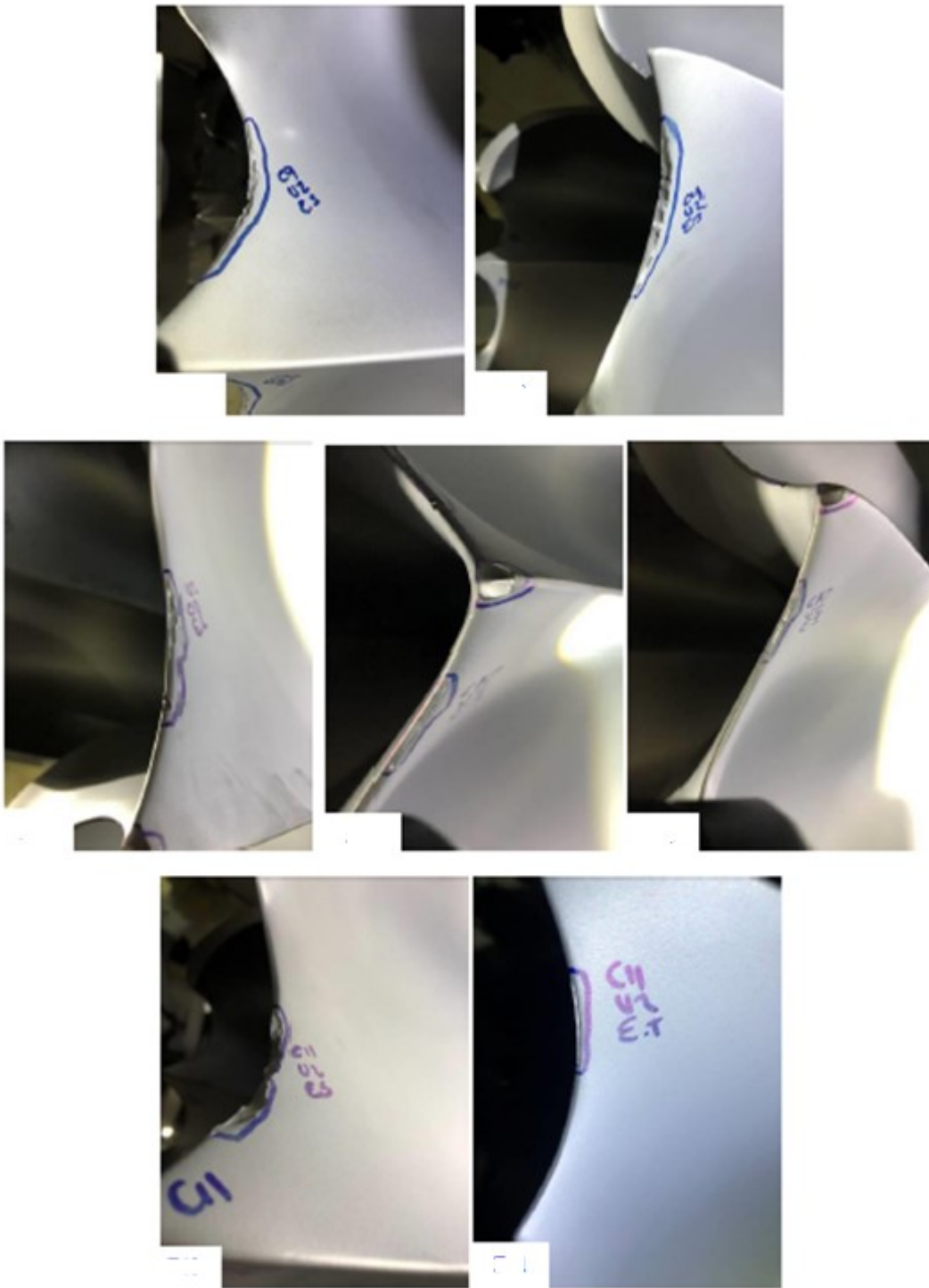


Figura 61. Falta de recubrimiento cangilon 9,10 y 11.

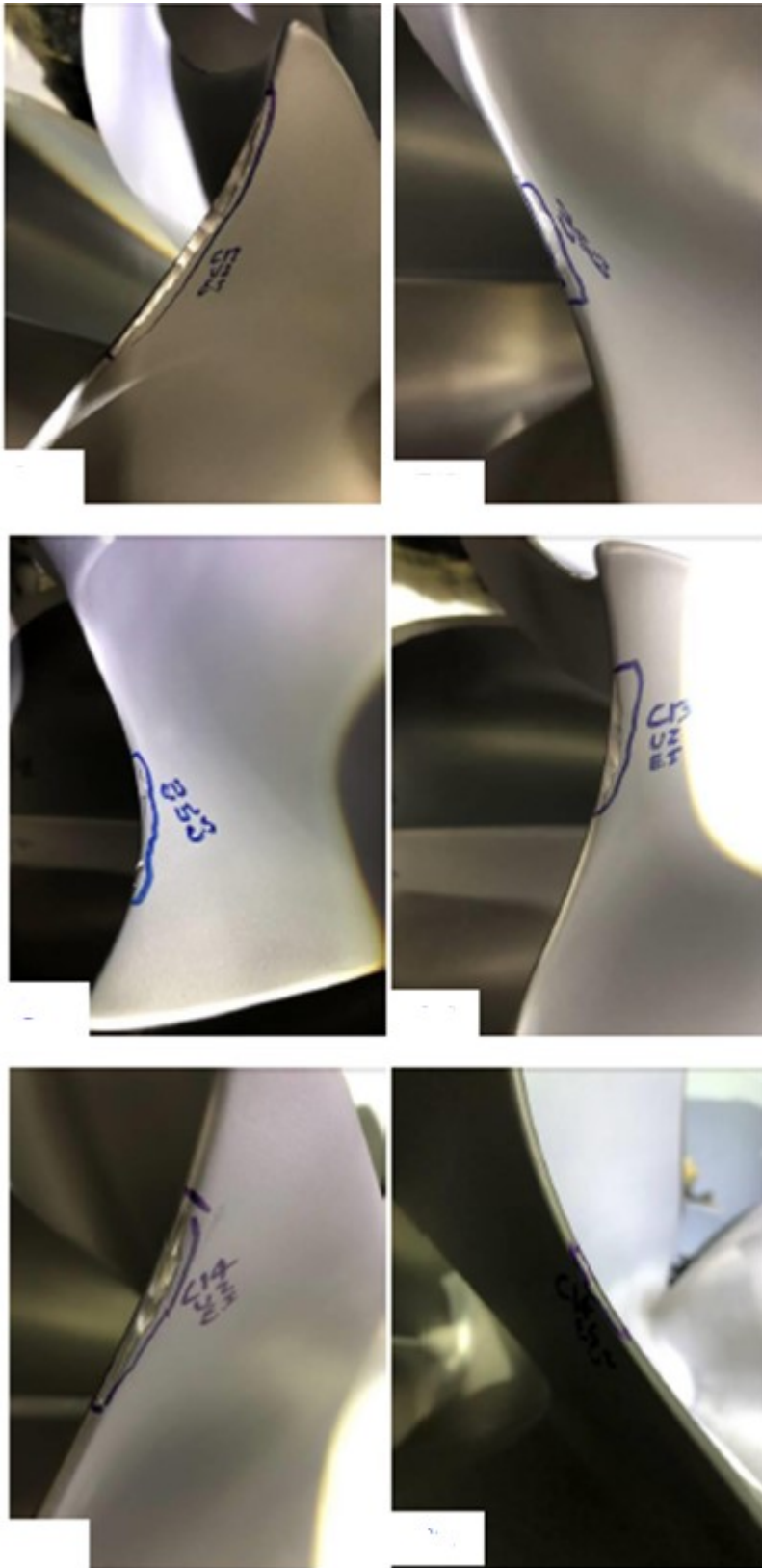


Figura 62. Falta de recubrimiento cangilon 12, 13 y 14.

Tabla 38. Cangilón 7 medidas en micras.

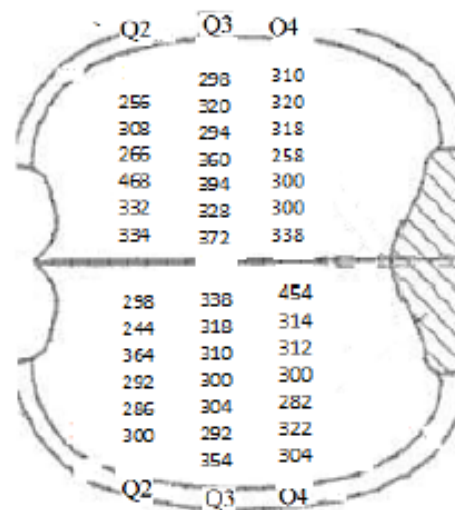
	Q2	Q3	Q4
1	264	282	308
2	302	296	314
3	274	314	292
4	362	318	376
5	294	272	322
6	312	328	326
7	244	368	446
8	300	340	262
9	336	354	294
10	288	280	258
11	222	328	326
12	260	298	320
13	---	312	302
14	---	298	298

Tabla 39. Cangilón 11 medidas en micras.

	Q2	Q3	Q4
1	298	322	212
2	320	330	274
3	290	302	296
4	364	320	298
5	328	320	250
6	312	366	294
7	364	402	416
8	300	346	246
9	392	316	220
10	316	334	358
11	342	320	304
12	288	316	290
13	---	332	320
14	---	296	304

Tabla 40. Cangilón 17 medidas en micras.

	Q2	Q3	Q4
1	300	354	304
2	286	292	322
3	292	304	282
4	364	300	300
5	244	310	312
6	298	318	314
7	334	338	454
8	332	372	338
9	468	328	300
10	266	394	300
11	308	360	258
12	256	294	318
13	---	320	320
14	---	298	310



Anexo E. Plantillas utilizadas para medir el espesor del recubrimiento del cangilón

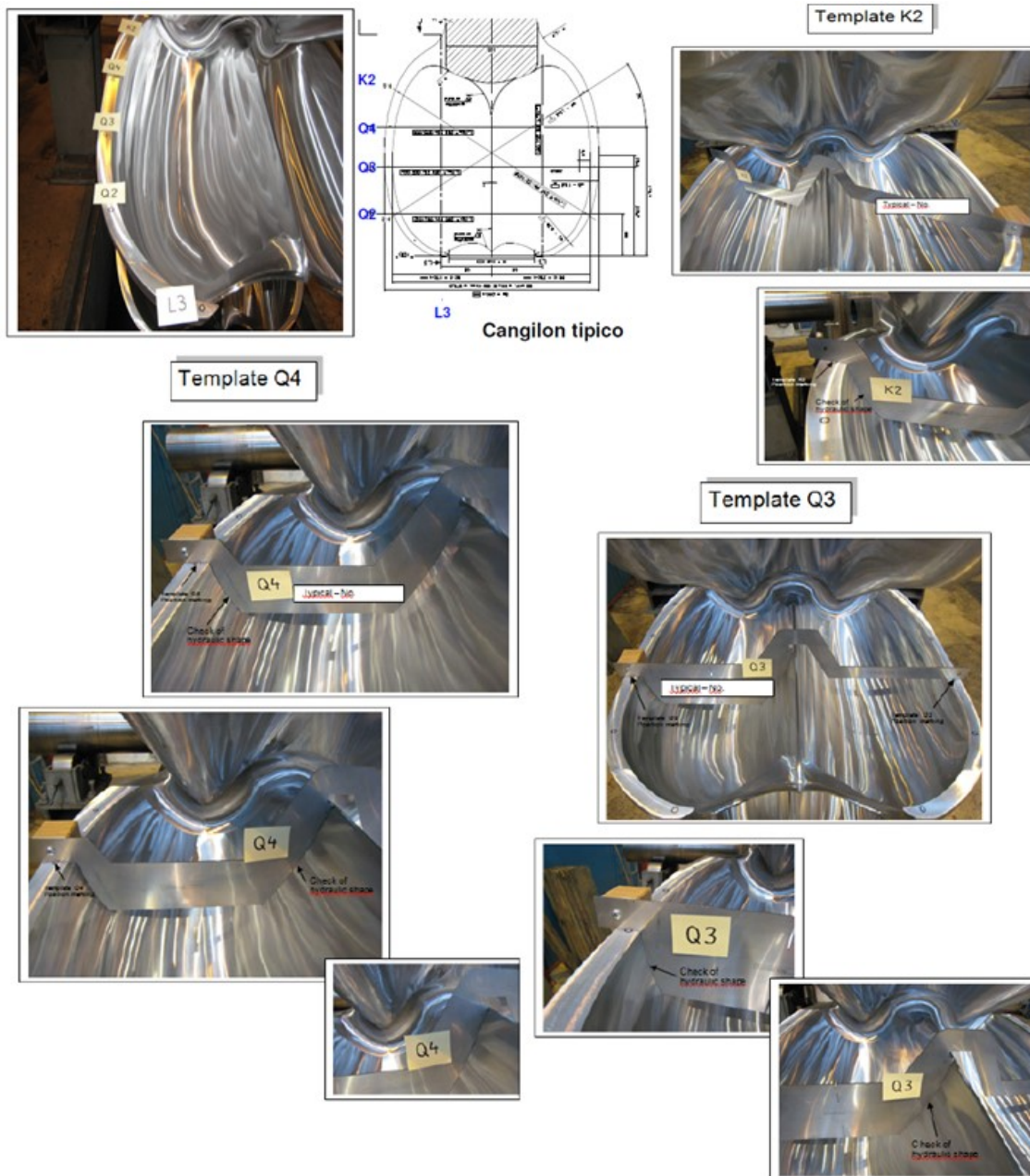


Figura 63. Plantillas Q2,Q3,Q4 utilizadas para medir la pérdida del perfil de cangilón.



Figura 64. Plantillas para medir la pérdida de material en el cangilon.

