

Hidro-abrasión en turbinas Francis: caso de estudio en cinco aprovechamientos hidroeléctricos instalados en la zona del Batolito antioqueño.

Victor M. Cock*

Estudiante de Maestría en Ingeniería, Universidad EAFIT

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Article history:

Received 00 December 00

Received in revised form 00 January 00

Accepted 00 February 00

Palabras clave:

Recursos hidro eléctricos

Pequeñas centrales hidroeléctricas PCH

Plantas menores filo de agua

Erosión

Hidro-abrasión en turbinas

Francis

RESUMEN

Colombia es un escenario excepcional para el aprovechamiento de los recursos en la generación hidroeléctrica: posee una de las mayores cuencas hidrográficas del mundo, niveles pluviométricos elevados y condiciones geográficas convenientes. Sin embargo, cuencas tan importantes como la del río Magdalena junto con sus afluentes son grandes aportantes de sedimentos, lo que representa un reto para la ingeniería, operación y mantenimiento de los proyectos que aprovechan y aprovecharán sus recursos; para los próximos 4 años la matriz energética de Colombia tiene planeado aumentar en 1,6 GW la generación hidroeléctrica con pequeñas centrales hidroeléctricas y plantas menores a filo de gua, que generalmente son las más damnificadas por el desgaste hidro-abrasivo. El flujo con sedimentos que ingresa a una planta de generación y que atraviesa los pasajes de las turbomáquinas causan desgaste erosivo de los componentes hidráulicos acarreado diversos problemas como la pérdida gradual de la eficiencia hidráulica y volumétrica, alteración de los perfiles, aparición de erosión por cavitación que acelera el desgaste, debilitamiento estructural, pulsaciones de presión y vibraciones. En casos extremos el desgaste erosivo puede llegar a generar falla por fatiga del rodete. El desgaste erosivo incide de manera directa en la producción de energía, reduce el factor de planta, aumenta las frecuencias de mantenimiento y los costos operativos. Este estudio presenta cinco proyectos hidroeléctricos de características similares, instalados en la unidad geológica del Batolito antioqueño y a los cuales se les han realizado inspecciones periódicas y seguimiento del desgaste erosivo debido a la hidro-abrasión. El estudio permite analizar las características y variables que inciden en el fenómeno de erosión asociando la información técnica con los datos de operación de las plantas, caracterización de sedimentos de la zona y registros de medida y fotográficos logrados en inspecciones programadas de las 2000, 4000 y 8000 primeras horas de operación de las turbomáquinas. Finalmente, el estudio plantea la discusión y conclusiones alrededor del fenómeno de la erosión por hidro-abrasión, sus causas, sus efectos y estrategias para minimizarlos.

© 2014 Holy Spirit University of Kaslik. Hosting by Elsevier B.V. All rights reserved.
Peer review under responsibility of Holy Spirit University of Kaslik.

1. Introducción

Colombia tiene gran disponibilidad hidráulica y condiciones topográficas aptas para el aprovechamiento de los recursos en la generación de energía eléctrica. La precipitación media anual en Colombia es igual a tres veces el promedio mundial y dos veces el promedio suramericano [1]. Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM la región Andina posee una gran diversidad pluviométrica a lo largo de la cordillera oriental, entre 1000 y 1500 mm, en los Valles del Alto Magdalena y Alto Cauca desde 2500 hasta 3000 mm, y núcleos máximos

de 5000 a 7000 mm en las cuencas del Medio Magdalena y Medio Cauca [2][3].

The Nature Conservancy presenta el desarrollo de los proyectos hidroeléctricos a nivel mundial asociados a las cuencas hidrográficas [4]. La Ilustración 1 demarca las zonas geográficas respecto a las variables “abundancia de agua” y “desarrollo de la hidro-energía” en términos de proyectos existentes, en construcción y planeados; la cuenca del Magdalena una de las más grandes de Sur América se identifica en la figura con sombra

* Autor correspondiente.

Correo electrónico E-mail: vcock@eafit.edu.co

azul claro que indica un gran potencial hidráulico de la zona con proyectos aun no desarrollados.

A un nivel más detallado, el estudio [4] ilustra el desarrollo del potencial hidroeléctrico con plantas existentes, en construcción y proyectadas en la

zona de influencia de las cuencas del río Magdalena y del río Cauca como se identifica en la Ilustración 2, también se muestra el predominio de los proyectos donde se encuentran los afluentes delimitados por las cordilleras occidental y central y en el área de latitud del departamento de Antioquia.

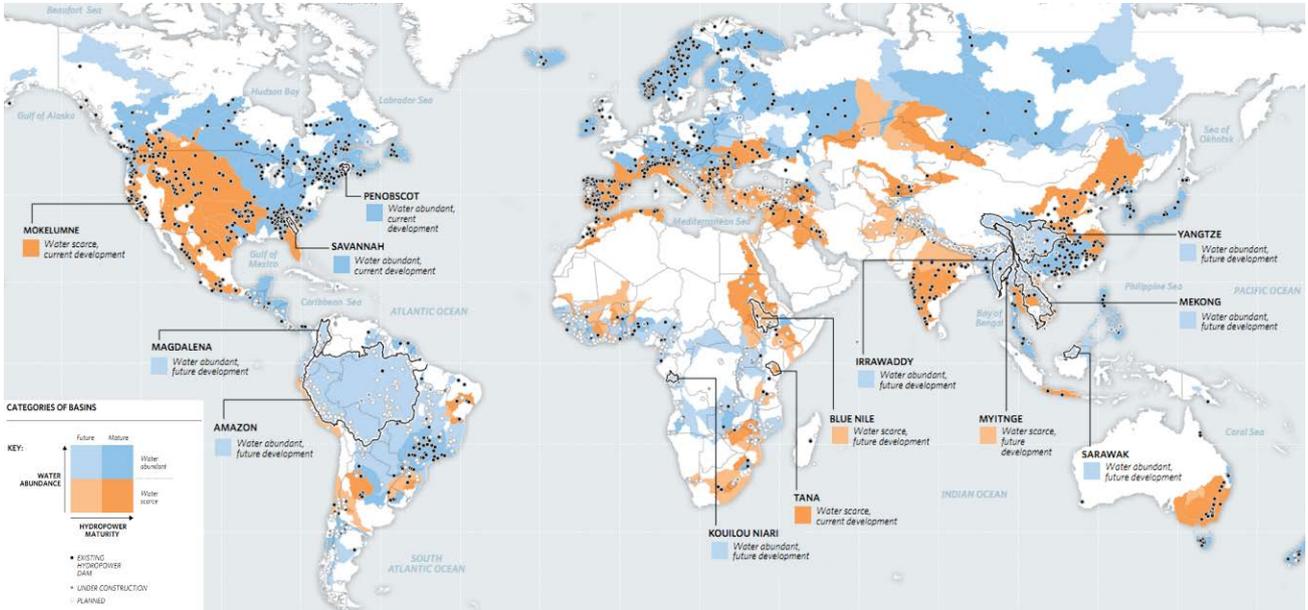


Ilustración 1. Desarrollo de proyectos hidroeléctricos según las cuencas [4].

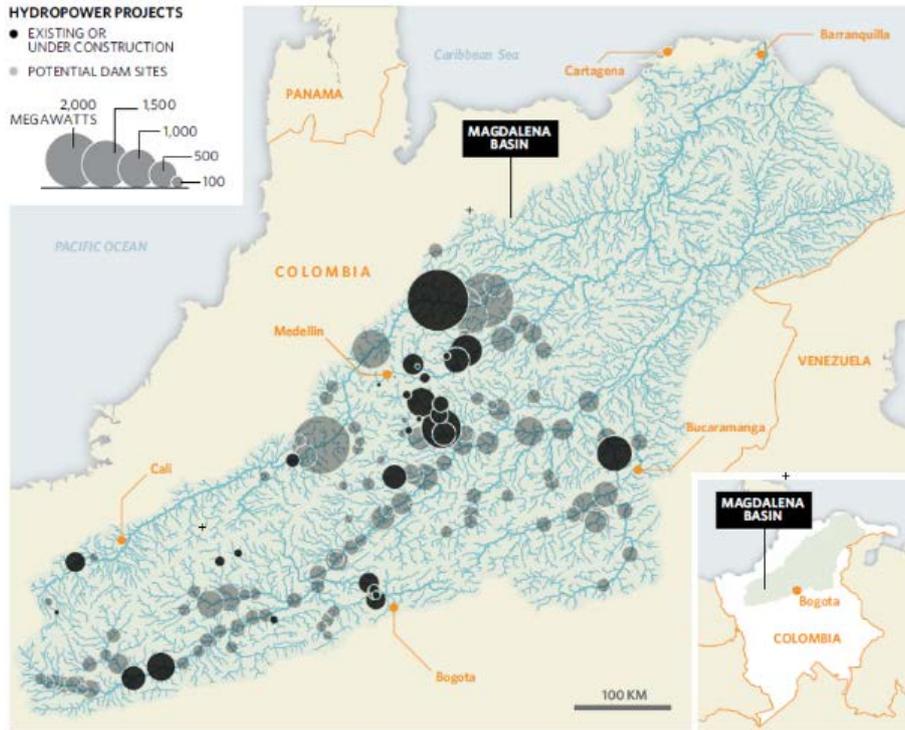


Ilustración 2. Potencial hidroeléctrico con plantas existentes, en construcción y proyectadas en la zona de influencia de las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca [4].

La disponibilidad hidráulica junto con los diferenciales de altura aportados por los nudos orográficos y relieve de la Cordillera de los Andes favorecen las condiciones para la generación hidroeléctrica en proyectos de mediana y alta cabeza. El potencial de generación en recursos hidroeléctricos en Colombia se estima en 90.000 MW con un aprovechamiento del 11% al 12% reportado en 2010 [1], actualmente el sistema eléctrico colombiano cuenta con 16,8 GW de generación instalada al SIN, de los cuales 1,4 GW son pequeñas centrales hidráulicas y filo de agua [5]. Se proyecta que este tipo de plantas aumentará la generación a 3 GW en el 2023.

A la fecha se encuentran instalados en Colombia 117 plantas hidroeléctricas no despachadas centralmente, grupo que es conformado por las pequeñas centrales hidroeléctricas y las plantas menores como define CREG [6] [7]; el reporte de XM [8] ilustra las plantas hidroeléctricas no despachadas centralmente y puestas en operación entre 1925 y 2018, los datos que se representan en la Ilustración 3 muestran la evolución en el tiempo de estos proyectos hidroeléctricos; se destaca el incremento del número de proyectos en servicio luego de que se emite la resolución 086/1996 donde se favorecen las condiciones para la comercialización de la energía producida por plantas de capacidad efectiva menor a 10 MW y entre 10 MW y 20 MW.

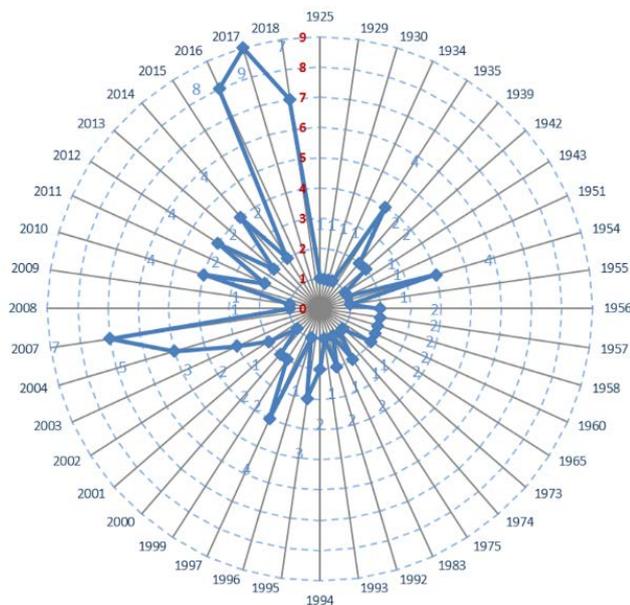


Ilustración 3. Proyectos hidroeléctricos no despachados centralmente en Colombia (PCHs y plantas menores) entrando en servicio entre 1925 y 2018. Gráfica derivada de datos obtenidos de XM [8].

De la mano de todos estos recursos y potencial para la generación hidroeléctrica, en Colombia se presenta uno de los mayores retos que impacta la operación y mantenimiento de las plantas de generación; junto con la cadena montañosa del Himalaya, los Andes es el principal aportador de sedimentos fluviales del mundo con sus ríos Amazonas, Paraná, Orinoco y Magdalena [9]. Las cuencas tributarias al río Magdalena le dan el primer puesto como aportador de sedimentos al Atlántico (560 t km-2año-1) casi

tres veces el aporte del Amazonas (190 t km-2año-1) y mucho mayor que la del Orinoco (150 t km-2año-1) [10].

Los sedimentos suspendidos en el flujo causan hidro-abrasión en las estructuras civiles y en las turbo-máquinas, los factores y las variables que inciden en el fenómeno son múltiples y aunque cada una de éstas ha sido estudiada extensamente de manera independiente su acción conjunta genera un efecto sinérgico que hace muy complejo estimar el fenómeno. Rai [11] plantea en el caso de estudio del efecto erosivo en una turbina Kaplan en India que aunque los parámetros que generan la hidro abrasión son identificados, el fenómeno no es comprendido completamente.

No obstante, el desarrollo mundial creciente de las energías renovables en las últimas dos décadas ha requerido grandes esfuerzos en la investigación de la hidro abrasión, principalmente, por las implicaciones económicas que conlleva el desgaste de los equipos por el efecto erosivo. La erosión en las turbo-máquinas induce la cavitación, genera pulsaciones de presión y vibraciones, causa pérdida gradual de la eficiencia [11]; en casos extremos el desgaste erosivo puede llegar a generar falla por fatiga del rodete [12]. La producción de energía se ve directamente afectada por la reducción del factor de capacidad o factor planta, esto debido al aumento de las frecuencias y períodos de mantenimiento que incrementa los costos por insumos para las reparaciones, por repuestos, por aumento de mano de obra, por aumento en los costos directos, entre otros.

En las turbinas Francis los sedimentos socaban y erosionan las superficies de los elementos rotantes y estacionarios modificando los perfiles hidráulicos del equipo diseñados para unas condiciones nominales. La pérdida de material y los socavamientos causan vórtices y turbulencia al paso del flujo que reducen la eficiencia hidráulica y amplía las holguras de los laberintos de turbina hacia la descarga y hacia la tapa de turbina lo que reduce la eficiencia volumétrica. El fenómeno de erosión es particularmente elevado en las plantas tipo filo de agua, donde su estructura de captación está conectada directamente al río lo que hace más complejo retener y separar del flujo los sedimentos finos y arcillas antes de ser conducidos y turbinados.

En la Ilustración 4 se identifica un esquema clásico del proceso del flujo desde la captación hasta la descarga al río de un proyecto hidroeléctrico tipo filo de agua o “run-of-river”. En la ilustración se identifican las estructuras y las obras civiles asociadas al proceso.

En el presente artículo, cinco proyectos hidroeléctricos del “tipo planta menor” a filo de agua desarrollados en la unidad geológica denominada Batolito antioqueño, son considerados dentro del estudio de erosión. Adicionalmente al sitio de instalación, estos proyectos presentan similitudes importantes. Sus parámetros de diseño de caudal y de altura neta los agrupa dentro de las turbinas Francis de alta cabeza y baja velocidad específica, entre $32,9 < N_q < 43,9$ (Velocidad específica N_q , parámetro de clasificación de turbinas que indica la velocidad de rotación en revoluciones.min⁻¹ con 1m de salto y 1m³/s de caudal, [13]); son turbo-máquinas con disposición de eje horizontal, son proyectos contemporáneos desarrollados por la empresa consultora HMV Ingenieros LTDA, han entrado en operación comercial entre 2010 y 2017. Los equipos turbogeneradores son de tecnología vigente y fueron suministrados por dos fabricantes reconocidos, los tres primeros puestos en operación comercial fueron suministrados por Vatech/Andritz y los dos últimos por Voith.

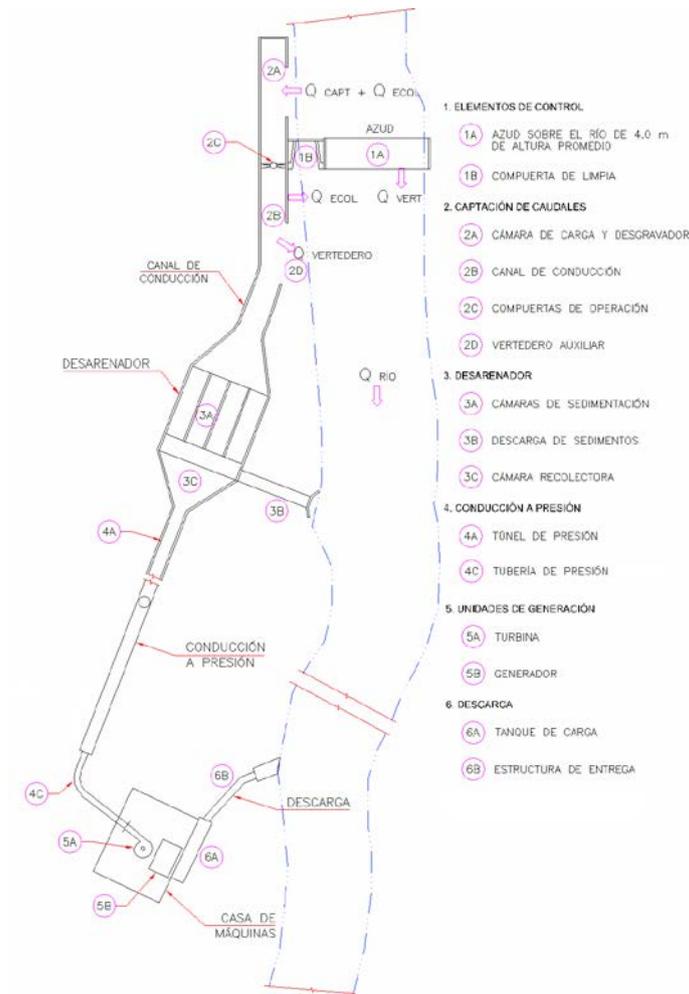


Ilustración 4. Esquema del flujo y obras civiles desde la captación hasta la descarga al río del proyecto hidroeléctrico El Molino. Cortesía HMV Ingenieros [14].

La empresa consultora hizo el desarrollo integral de los proyectos, lo que comprende estudios de pre-factibilidad, ejecución de la ingeniería, suministro de equipos, construcción, puestos en servicio y posteriormente los servicios al cliente/operador en el acompañamiento técnico de la operación y mantenimiento, actividades que incluyen las inspecciones de garantía pactadas con los fabricantes de los equipos y realizadas en el cumplimiento de las primeras 2000 y 4000 horas de operación de las turbinas así como la inspección de garantía por cavitación en el cumplimiento de las 8000 horas de operación [15] e inspecciones posteriores.

Las inspecciones de garantía permiten tomar datos, medidas y registros de las máquinas a un nivel muy detallado, el objeto de este caso de estudio es presentar una simple aproximación al fenómeno de erosión a partir de registros y medidas tomadas en las inspecciones de los proyectos en mención y durante el periodo 2010-2018. Considerando la amplitud del campo de estudio, este informe se enfocará en el análisis de los aspectos relativos al fenómeno de erosión que ocurre sobre los alabes directrices y placas de desgaste de las turbinas.

El contenido de este artículo está compuesto por cinco partes que se presentan en el siguiente orden lógico. En la primera parte se introducen argumentos del potencial hidroeléctrico de Colombia relacionando con los aspectos geográficos e hidrológicos incidentes en la erosión de las turbinas. En la segunda parte se puntualizan las características básicas de los proyectos en estudio. Se incluyen allí las descripciones apreciables de las cuencas hidrológicas y localización. La tercera parte introduce a los aspectos relativos del fenómeno de erosión en las turbinas Francis. En ese segmento se citan algunas de las referencias y autores reconocidos en el estado del arte de esta área de estudio. En la cuarta parte se presentan los registros, evidencias y datos logrados en las inspecciones de garantía. La información se compara y analiza bajo la luz de las referencias, la literatura recabada y la experiencia lograda por el autor en los procesos de inspección de los equipos. En la quinta parte se presentan las conclusiones con un enfoque dirigido hacia la comprensión del fenómeno de erosión en las plantas hidroeléctricas y las acciones que pueden tomarse en cualquier fase de la ingeniería, operación y mantenimiento (O&M) que ayuden a reducir su efecto

El presente estudio será de utilidad en los procesos de concepción y viabilidad de los proyectos, así como en el diseño y elaboración de especificaciones, en la consultoría y en la operación de las plantas

hidroeléctricas con turbina tipo Francis donde el efecto erosivo debido a los sedimentos suspendidos en el agua a turbinar deba ser considerado.

2. Descripción general de los proyectos en estudio

2.1. Datos básicos

Los proyectos hidroeléctricos en estudio: Caruquia, Guanaquitas, El Popal, El Molino, San Matías, por su capacidad efectiva están dentro de la clasificación de las “Pequeñas Centrales Hidroeléctricas” (PCH) de acuerdo con UPME [16][17], y “plantas menores” como define CREG [6][7], todas con el esquema de captación a filo de agua. Los proyectos se han puesto en operación comercial en el mismo orden que se presentan en líneas arriba, Caruquia es la primera operando desde enero del 2010. La Tabla 1 resume

datos de capacidad instalada por planta, número de unidades generadoras, tipo de planta, localización y fecha de entrada de operación comercial.

Las turbo-máquinas son de tipo Francis con disposición de eje horizontal. Por las condiciones de diseño de salto neto y caudal, las turbinas de los 5 proyectos presentan similitud. Cada unidad generadora tiene una potencia en turbina del orden de 10 MW. Las máquinas son Francis de “alta cabeza”, de acuerdo al salto neto de operación, y “lentas” de acuerdo a sus velocidades específicas, entre $32,9 < N_q < 43,9$. La Tabla 2 presenta los datos relevantes de turbinas por proyecto, la Ilustración 5 demarca la zona de clasificación de turbinas de acuerdo al salto neto y la velocidad específica.

Tabla 1. Características básicas de los proyectos en estudio. Información adaptada del reporte Lista de Pequeñas Centrales Eléctricas de XM. Fecha del reporte: 24 de agosto de 2019, <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=lista>

Central	Capacidad Efectiva [MW]	N° unidades	Tipo de planta	Departamento	Municipio	Fecha de entrada
Caruquia	9.5	1	PCH	Antioquia	Santa Rosa de Osos	28/01/2010
Guanaquitas	9.5	1	PCH	Antioquia	Santa Rosa de Osos	30/06/2010
El Popal	19.9	2	Planta menor	Antioquia	Cocorná	31/03/2014
El Molino	19.9	2	Planta menor	Antioquia	Cocorná	19/04/2017
San Matías	19.9	2	Planta menor	Antioquia	Cocorná	25/04/2017

Tabla 2. Características básicas de las turbinas de los proyectos en estudio.

Central	Salto neto [m]	Caudal de diseño [m³/s]	Capacidad Instalada [MW]	Velocidad de rotación [RPM]	Velocidad específica N_q [RPM]
Caruquia	172,3	6,35	9,8	720	38,15
Guanaquitas	168,1	6,50	9,7	720	39,32
El Popal	159,9	15,00	20,4	720	43,85
El Molino	237,4	9,80	20,4	900	32,94
San Matías	237,6	9,80	20,4	900	32,92

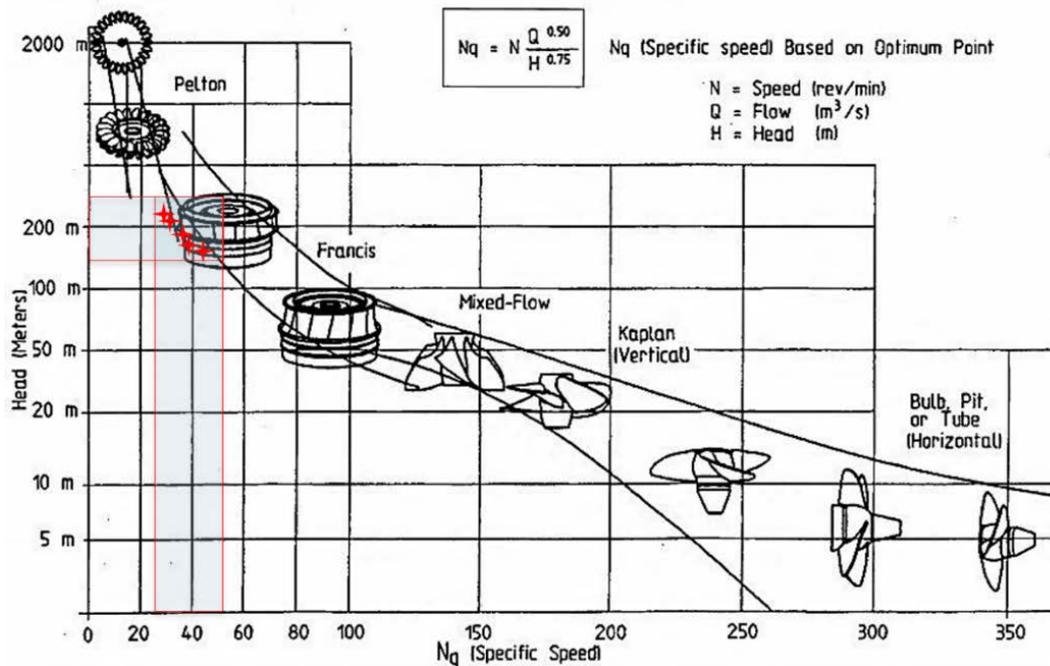


Ilustración 5 . Zona de clasificación de turbinas H vs Nq para los proyectos Caruquia, Guanaquitas, El Popal, El Molino y San Matías. La zona de clasificación da en común Francis de alta cabeza y baja velocidad específica. Adaptado de ASME [18]

2.2. Descripción de las cuencas

Las cuencas de los proyectos hidroeléctricos de estudio se encuentran hacia las zonas centro/oriente y sur/oriente de Antioquia, todas en el área de influencia de la unidad geológica denominada Batolito antioqueño.

Cuenca de los proyectos Caruquia y Guanaquitas.

El desarrollo de los proyectos hidroeléctricos Caruquia y Guanaquitas, aprovecha la cuenca alta del río Guadalupe. La cuenca se ubica en el norte del departamento de Antioquia, en la denominada meseta de Santa Rosa de Osos, cubriendo territorio de los municipios de Santa Rosa de Osos, Carolina del Príncipe y Gómez Plata. El río Guadalupe sigue un curso Occidente-Oriente, recibiendo por la vertiente derecha, entre otras, las quebradas Los Mártires, Santa Cecilia, San José, Santa Bárbara, El Pedrero y Guanacas. Por la vertiente Izquierda se destacan las quebradas San José, Brand, San Francisco, San Ramón, Rionegrito y Claritas [19].

Cuenca del proyecto El Popal.

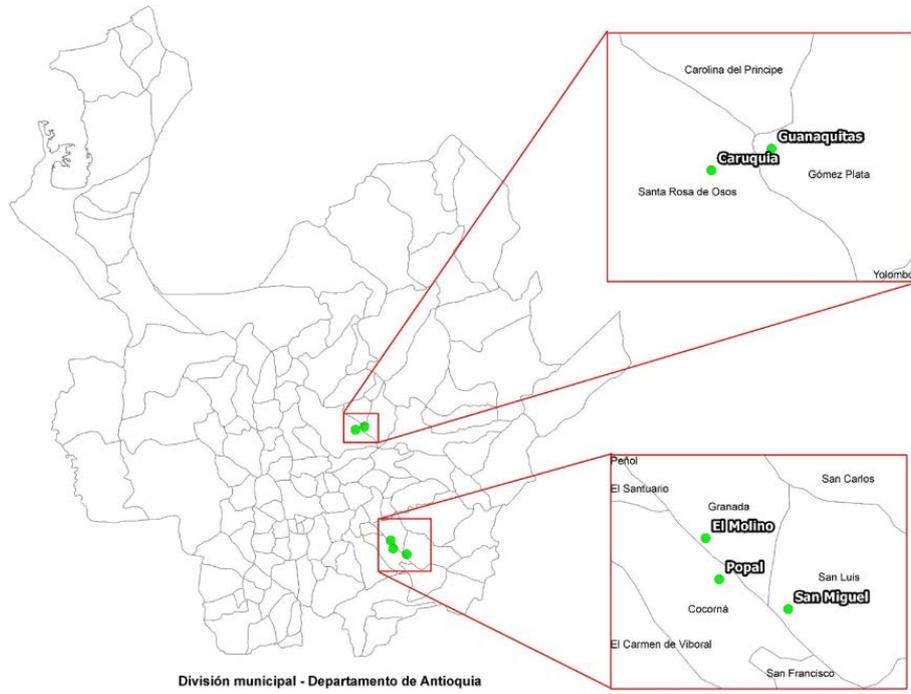
El proyecto hidroeléctrico El Popal aprovecha la cuenca del río Cocomá que se localiza al oriente del departamento de Antioquia a unos 95 km de

la ciudad de Medellín, en jurisdicción del municipio de Cocomá, en las veredas La Aurora, La Inmaculada, La Piñuela y San Lorenzo.

Cuenca de los proyectos El Molino y San Matías.

Los proyectos hidroeléctricos El Molino y San Matías operan en cascada, es decir que la descarga del agua turbinada de El Molino se acumula en un tanque de carga y se conduce hacia San Matías sin necesidad de una segunda captación del río. La captación de El Molino se localiza en la cuenca del río San Matías, afluente del río Cocomá, el cual a su vez descarga sus aguas en el río Calderas. El principal afluente del río San Matías es el Tafetanes que vierte sus aguas 1.000 m antes del sitio de captación [14].

En la Ilustración 6 se identifican las posiciones geográficas de las cuencas dentro del departamento de Antioquia. Entre tanto la Ilustración 7 hace una descripción gráfica de la zona de influencia de cada cuenca junto con información geológica.



División municipal - Departamento de Antioquia

Ilustración 6 . Localización de las estructuras de captación, grafica derivada del INGEOMINAS Servicio Geológico Colombiano [20].

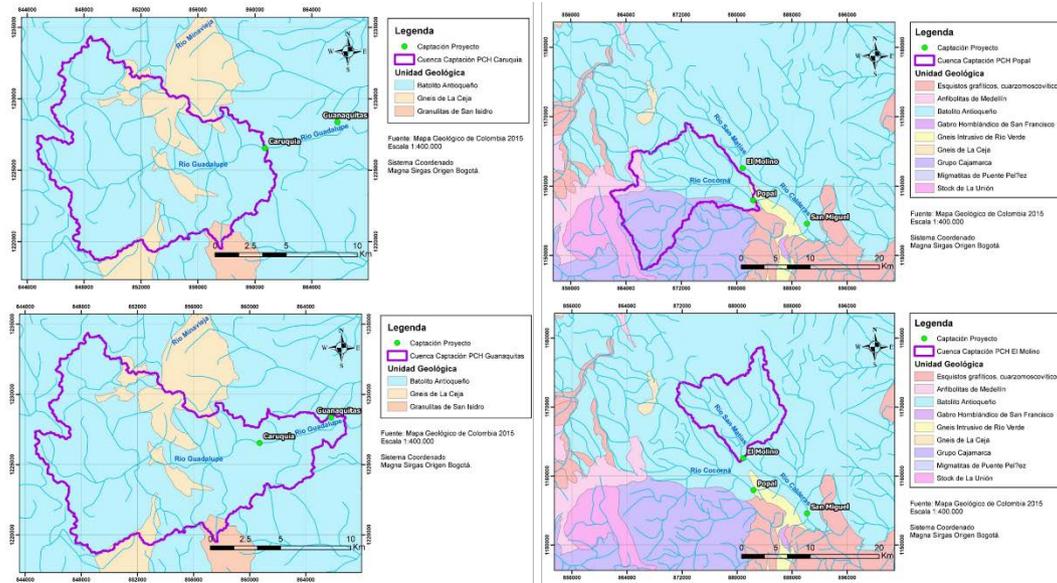


Ilustración 7 . Descripción gráfica y geológica de las cuencas, grafica derivada de los mapas geológicos asociados a las zonas de Medellín Oriental, Santa Rosa de Osos, San Carlos, Yolombó. INGEOMINAS planchas [21]–[26].

3. Conceptos de la hidro-abrasión

3.1. Mecanismo de la erosión

Los artículos e información técnica denominan a la erosión en máquinas hidráulicas debida a partículas sólidas como *turbine erosion*, *sand erosion*, *silt erosion*, *hydro-abrasive wear* (términos en idioma inglés) [27]. El IEC 62364 [28] utiliza el término *hydro-abrasive erosion* o desgaste hidro-abrasivo, término que se adoptará en este estudio así como los indicados por el S.I. y los relevantes del IEC/TR 61364 [29].

Karelin [30], conceptualiza que la erosión de los componentes de las máquinas hidráulicas, debido al paso del flujo que transporta sedimentos, debe interpretarse como un proceso de alteración gradual de las geometrías de las superficies. El proceso se desarrolla en respuesta a la acción de partículas sólidas abrasivas suspendidas en el agua sobre las superficies del equipo que podría denominarse una “abrasión hidráulica” debida a un proceso abrasivo mecánico.

En términos generales los autores y referencias técnicas coinciden en los parámetros de análisis que determinan la hidro-abrasión. El IEC 62364 [28] anexo D, establece que la evaluación de la erosión de turbinas por el efecto de la hidro-abrasión incluye los estudios de: la concentración de las partículas, la distribución del tamaño de partículas, la composición mineralógica de los sedimentos y finalmente su geometría.

Thapa [31] y Neopane [32] puntualizan cuatro mecanismos básicos aplicables a las máquinas hidráulicas que generan el desgaste hidro-abrasivo debido a partículas sólidas; estos son: erosión abrasiva, fatiga, deformación plástica y fractura frágil.

La erosión abrasiva se da cuando las partículas golpean las superficies en ángulos de incidencia bajos, removiendo el material del sustrato o superficie por un efecto de corte. El mecanismo de fatiga y debilitamiento del sustrato es consecuencia del impacto repetido de partículas que inciden con ángulos elevados sobre las superficies. La deformación plástica se da cuando las partículas chocan la superficie con velocidad media y ángulos elevados. Las colisiones generan limallas y hojuelas que luego son deprendidas. La fractura frágil toma lugar en sustratos frágiles cuando las partículas golpean con ángulos elevados y velocidades medias. El fenómeno es más propenso cuando las partículas tienen bordes agudos.

Dentro del estudio de Thapa [31] se establecen tres categorías donde se agrupan los factores que inciden en el fenómeno de la erosión por hidro-abrasión:

- Condiciones de operación, como velocidad y aceleración de flujo, ángulo de impacto de la partícula, concentración de sedimentos.
- Características de la partícula de erosión, tamaño, forma dureza, material.
- Sustrato (material erosionado), composición química, propiedades elásticas, morfología de la superficie.

3.2. Partículas abrasivas

Las diferentes propiedades de las partículas suspendidas en el flujo a turbinar tienen una gran relevancia en los procesos de desgaste erosivo. Parámetros como la dureza, el tamaño, la geometría de partícula inciden directamente en la erosión [33].

La caracterización de las partículas y el análisis de los sedimentos abrasivos que pasan a través del rotor de turbina y elementos estacionarios, se enfoca en los siguientes parámetros, IEC 62364 [28]: concentración de partículas, distribución del tamaño de partículas, composición mineral de las partículas, geometría de la partícula.

La concentración de partículas se relaciona con la cantidad de material particulado que no se disuelve en el agua. Tiene varias formas de medirse tales como partículas por millón o ppm, kg/m³, etc.

La distribución del tamaño de partículas es un parámetro importante en los análisis de hidro-abrasión en turbinas. En Colombia este parámetro es altamente variable especialmente en proyectos tipo filo de agua. La variabilidad de la distribución del tamaño de partículas se debe a factores naturales como la geología y el efecto erosivo del agua sobre esta y la actividad invernal, y otros antropogénicos como la agricultura y la minería que se lleva a cabo en los acuíferos aguas arriba de los proyectos.

Respecto al tamaño de las partículas en suspensión, de acuerdo con ISO-4665 [34] el tamaño de los sedimentos se clasifica en: “sedimento grueso” que contiene partículas con un diámetro mayor que 0,25 mm, “sedimento medio” que contiene partículas con un diámetro entre 0,062 mm to 0,25 mm, “sedimento fino” que contiene partículas con un diámetro menor que 0,062 mm. No obstante, los proyectos hidroeléctricos tienen limitaciones espaciales y económicas para construir los desarenadores que logren retener las partículas más pequeñas. Estas obras civiles de proyectos tipo filo de agua generalmente usan el principio funcional de decantación para retener partículas. Las partículas más pequeñas requieren mayor tiempo de permanencia en el tanque sedimentador para lograr decantarse. Se encuentra que los proyectos contemporáneos tipo filo de agua se están diseñando con desarenadores que retienen partículas mayores que 0,25 mm. No obstante, partículas menores a 0,2 mm pueden producir daño severo por hidro-abrasión en las turbomáquinas de alta cabeza. Thapa [31] [35] indica que la construcción de desarenadores con capacidad de retención de partículas menores a 0,2 mm es significativamente costoso.

La a forma de las partículas también es un factor de importancia en el control de la erosión, variables tales como resistencia, densidad, permeabilidad, compresibilidad, capacidad de transporte están relacionadas con la forma y en consecuencia con la capacidad de erosionar. Se clasifican las formas de las partículas de manera cualitativa así: “redondas”, “semi-redondas” y “angular” [35], aunque el IEC 62364 [28] hace una variación a la clasificación: “redondeada”, “sub-angular” y “angular”. En esencia la partícula que tiene forma irregular con bordes afilados aumenta el desgaste hidro-abrasivo en tanto que las partículas con bordes redondeados generan un desgaste retardado. La Ilustración 8 muestra imágenes de referencia de clasificación de formas de partículas según IEC 62364 [27].

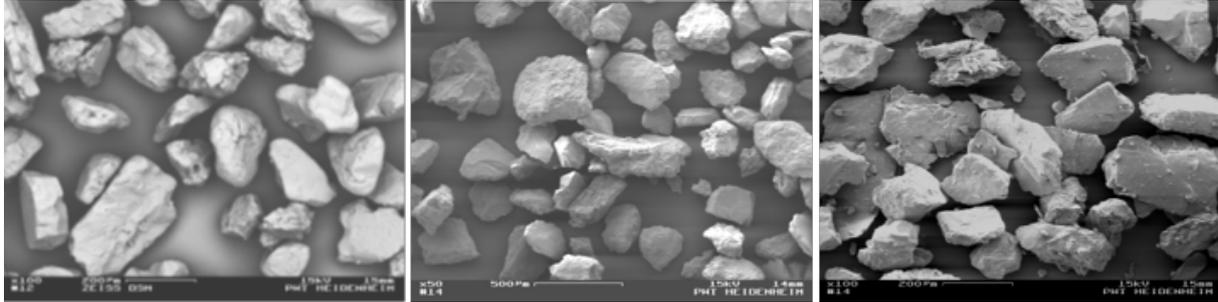


Ilustración 8 . Ejemplos típicos de geometrías de partículas, a) geometría de partículas redondeadas, b) geometría de partículas sub-angulares, c) geometría de partículas angulares. Tomado de IEC 62364 [28]

La composición mineral de las partículas tiene una gran importancia en los estudios de erosión de las turbo-máquinas. Particularmente en los proyectos tipo filo de agua es un requisito conocer la composición mineralógica de los sedimentos y de la materia transportada en el flujo a turbinar. La composición de los sedimentos la define las estructuras geológicas de las zonas de incidencia de los acuíferos que alimentan el proyecto.

La incidencia de los minerales en la magnitud de erosión está en su dureza. Partículas con mayor dureza generarán mayor daño debido al impacto y a la hidro-abrasión sobre las superficies y pasajes hidráulicos de las piezas que interactúan con el flujo. De esta manera la magnitud e

intensidad del daño erosivo depende de la relación de dureza de los sedimentos y de las superficies hidráulicas del equipo. V. Ya [30] indica que las partículas entre 5,0 a 5,5 de dureza Mohs y superiores hacen daño erosivo a las piezas de las turbo-máquinas.

Una buena referencia para la valoración comparativa entre los minerales, su dureza y nivel de abrasividad es indicada en la Tabla 3, tomada de [30]. El nivel o clase de abrasividad de los minerales son valorados bajo la misma escala de dureza Mohs.

Tabla 3. Características básicas de las turbinas de los proyectos en estudio. Extraída en idioma original de Karelin tabla1,1 [30]

Abrasivity class	Rock's specification according to their abrasivity	Abrasive measure (mg)	Typical rocks forming classes
1	Super-low abrasive	Below 5	Limestones, marbles, soft sulphides, apatite, halite, shales
2	Low abrasive	5 to 10	Sulphide and baryte-sulphide ores, argillites, soft slates
3	Below medium abrasive	10 to 18	Jaspilites, hornstones, magnetic thin lamella rocks, iron ores
4	Medium abrasive	18 to 30	Quartz and arkose fine grain sandstones, diabases, coarse grain pyrites, vein quartz, quartz limestones
5	Above-medium abrasive	30 to 45	Quartz and arkose middle grain and coarse grain sandstones, fine grain granites, porphyrites, gabbro, gneisses
6	Higher-medium abrasive	45 to 65	Granites, diorites, porphyrites, nepheline syenites, pyroxenites, quartz slates
7	High abrasive	65 to 90	Porphyrites, diorites, granites
8	Most abrasive	Above 90	Corundum containing rocks

3.3. Materiales del sustrato

La resistencia a la erosión está relacionada con las propiedades mecánicas del material en general, sin embargo la diferencia en la resistencia a la erosión de aceros de diferente dureza y aceros de aleación no es significativamente grande [35]. En términos de comportamiento a la erosión los materiales se clasifican en metales, cerámicas y polímeros. El mecanismo de erosión en el metal y aleaciones generalmente es por rasgado, mientras que para la cerámica pura es la ruptura de partículas, para los polímeros es mediante la eliminación de la matriz de unión.

La resistencia a la erosión del material se puede mejorar haciendo que la superficie del material sea extremadamente dura (por ejemplo, metales y cerámica) o que la superficie sea dura pero con módulo elástico significativamente bajo para que la energía cinética de las partículas se disipe. Este es el caso de los recubrimientos en caucho y polímeros que absorben parte de la energía de las partículas cuando impactan la superficie.

Para la erosión por sedimentos ningún acero inoxidable presenta una resistencia aceptable [36].

Los materiales dúctiles y frágiles tienen un comportamiento diferente al ángulo de incidencia de las partículas erosivas [37]. El ángulo de incidencia de las partículas es el comprendido entre la superficie erosionada y la trayectoria de la partícula justo antes del impacto. Si la partícula se mueve paralelo a la superficie el ángulo de incidencia es 0° . De manera análoga cuando la partícula se mueve normal a la superficie el ángulo de incidencia es 90° . Los materiales dúctiles presentan erosión severa en ángulos de incidencia bajos, la máxima erosión se ve entre 10° y 30° , mientras que la erosión es baja en impactos cercanos a la dirección normal. Para materiales frágiles la rata de erosión aumenta a medida que aumenta el ángulo de incidencia siendo mayor cuando es perpendicular.

3.4. Hidro-abrasión en turbinas Francis

H. Brekke es una de las principales referencias en el tema tratado en este estudio. El autor en [38] presenta tres categorías relacionadas a las turbomáquinas de acuerdo con su patrón de erosión como son: turbinas de impulso Pelton, turbinas de reacción Francis de alta cabeza y baja velocidad específica, y turbinas de reacción Kaplan de baja cabeza de alta velocidad específica.

Las turbinas a reacción de alto rango de cabeza son las que sufren mayores daños debido a la alta velocidad de los sedimentos transportados en el flujo [38]. Las siguientes partes de la máquina son afectadas por el desgaste hidro-abrasivo: válvula de admisión, caja espiral, by-pass, sistema de alivio de presión, rotor de turbina, laberintos y sellos de turbina, sello del eje y sistema del distribuidor que incluye los álabes directrices el cual es el foco de atención de este estudio.

En referencia al sistema de álabes directrices, Brekke da gran importancia a la velocidad del flujo y su correlación con la erosión, Brekke [38] y Thapa [31] señalan que en las zonas de álabes directrices de turbinas Francis hay un alto efecto de la hidro-abrasión debido al valor absoluto de velocidad y la alta aceleración del flujo que se genera en esta zona, Ilustración 9. En turbinas de alta cabeza, entre la entrada de los álabes directrices y la entrada al rodete, la cabeza de velocidad relativa $(v^2/2g)/H_n$ aumenta de 0,1 a 0,5. También indica que a velocidad normal la pérdida de presión a través de los álabes es aproximadamente el 40% de la cabeza neta H_n a apertura completa, y 50% a aperturas menores y en posición de cierre del distribuidor, lo que da a lugar al flujo cruzado que causa la erosión entre los álabes directrices y las placas de desgaste, Ilustración 9.

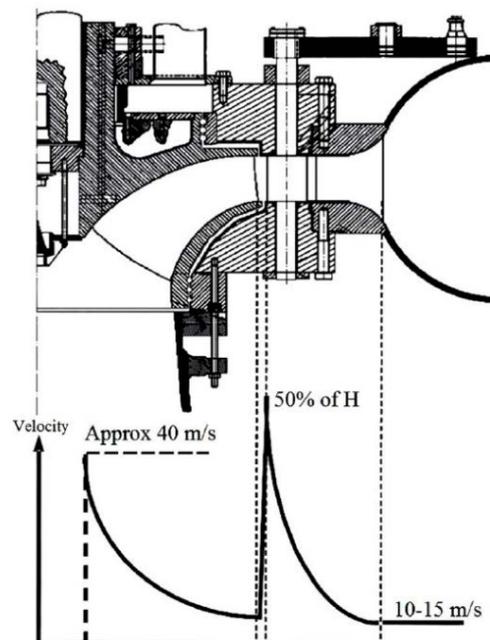


Ilustración 9 . Distribución de velocidad típica al paso del flujo de la cámara espiral hacia la turbina de turbinas Francis de alta cabeza. Adaptada de Thapa [31].

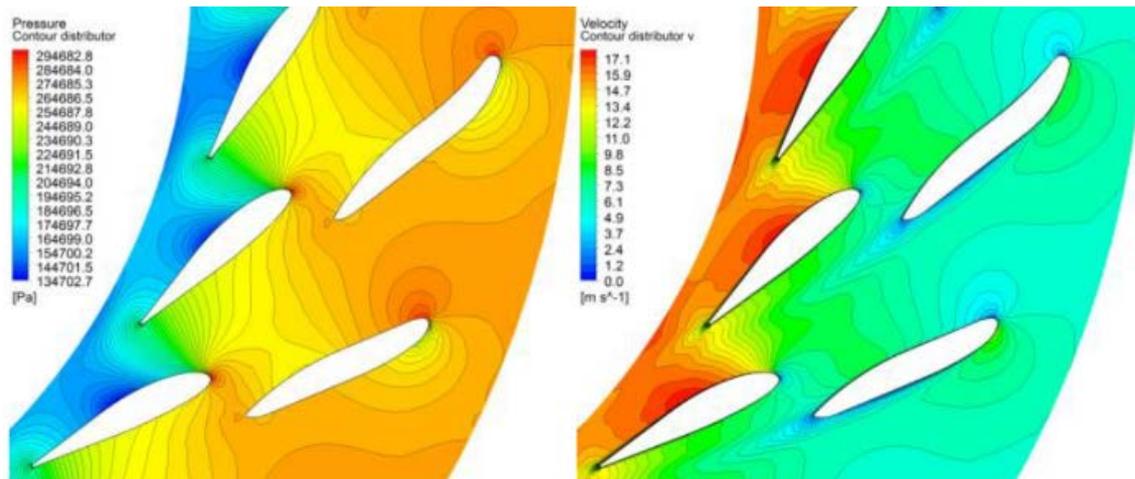


Ilustración 10 . Efecto de la aceleración y velocidad absoluta del flujo al paso del distribuidor, a) Contornos del cable de presión del flujo entre los álabes fijos y álabes directrices, b) Contornos del cable de velocidad del flujo entre los álabes fijos y álabes directrices. Tomada de Cheng [39].



Ilustración 11 . Huellas de herradura en placa de desgaste, turbina Francis del proyecto Caruquia, a) conjunto placa de desgaste lado del generador y turbina, b) detalle de la placa de desgaste con huella de herradura que muestra orientación de la apertura de los álabes directrices. Tomado de archivos del autor.

Cuando coexisten condiciones que favorecen el desgaste hidro-abrasivo y la erosión por cavitación en los álabes directrices, se produce un efecto sinérgico [28][40]. Ambos fenómenos se presentan claramente en los pasajes entre álabes directrices y placas de desgaste donde la velocidad de flujo es alta. En esa zona el desgaste de erosión mixto tiene una forma característica que se le denomina en la literatura *horse-shoe pattern* o patrón de herradura, [40], Ilustración 11.

La velocidad específica es un parámetro relevante para considerar en el estudio de la erosión en las turbo-máquinas. En las plantas de cabeza alta la velocidad específica es baja y, por lo tanto, la velocidad de flujo a través de los álabes directrices es alta. En esa región el desgaste erosivo es considerable. Por lo contrario, plantas con baja cabeza son de velocidad específica alta y el efecto erosivo es más significativo en el rotor. Expresado de otra manera, a mayor cabeza mayor velocidad de flujo y mayor desgaste erosivo; en las turbinas de alta cabeza la erosión en alabes directrices y componentes anexos tendrán mayor erosión que en los componentes de las turbinas de mediana y baja cabeza, IEC 62364 [28]. La intensidad de la erosión es proporcional al cubo de la velocidad del agua [32].

La erosión identificada en los álabes directrices y componentes anexos se debe a los siguientes fenómenos [38]:

- Erosión por turbulencia que se da especialmente en la región de salida debido a la alta velocidad y a granos finos de arena. La mayor erosión se detecta en las placas de desgaste.
- Erosión por flujo secundario que ocurre en el perímetro descrito por los álabes sobre las placas de desgaste y que son causados por los vórtices de herradura. Los granos finos y de mediano tamaño causan esta erosión, en esta zona se produce una alta erosión sobre la placa de desgaste en el contorno de los álabes.
- Erosión por fugas que se da en la holgura entre álabes y placas de desgaste y que incrementa el vórtice de herradura en el lado de succión. Adicionalmente el flujo secundario genera una alta erosión en el lado de presión y en la salida de succión debido a la separación y turbulencia del flujo. En turbinas de alta cabeza se identifica daño severo por este tipo de erosión.
- Aceleración del flujo principal generada por la rotación del agua entrante a la turbina. Esta crea una aceleración normal a las líneas de flujo y a las superficies de los álabes. Los sedimentos colisionan contra las superficies erosionándolas. Un flujo secundario creado por la aceleración normal a las líneas de flujo con sedimento fino, también crea una erosión especialmente en las esquinas entre álabes y placas de desgaste. Esta aceleración está en función de la velocidad sincrónica de la turbina.

Durante el funcionamiento de una turbina Francis a carga parcial se crea una desalineación entre los alabes directrices y los álabes fijos. Esta condición incrementa las turbulencias, los flujos secundarios, los flujos cruzados y los vórtices, condiciones más inestables que conducen a una mayor erosión si hay presencia de sedimentos.

4. Caso de estudio

Los proyectos en estudio Caruquia, Guanaquitas, El Popal, El Molino y San Matías fueron puestos en servicio comercial entre el 2010 y el 2017 en

la unidad geológica denominada Batolito antioqueño, que les da características hidrológicas, geológicas y sedimentarias similares. Las unidades turbo generadoras son turbinas tipo Francis, de eje horizontal y de acuerdo a sus parámetros de diseño, salto y caudal, se clasifican como máquinas lentas (baja velocidad específica). Adicionalmente los proyectos fueron diseñados, especificados y construidos por la misma empresa consultora, que además ha realizado las labores de acompañamiento técnico en la puesta en servicio, el mantenimiento, las inspecciones de garantía pactadas con los fabricantes de los equipos y realizadas en el cumplimiento de las primeras 2000 y 4000 horas de operación de las turbo- máquinas así como la inspección de garantía por cavitación en el cumplimiento de las 8000 horas de operación e inspecciones posteriores. Como se encuentra consignado en las especificaciones de los proyectos y de acuerdo con IEC-60609 [15].

Durante las inspecciones se tomaron registros dimensionales y fotográficos que han permitido evaluar la evolución del desgaste erosivo en el tiempo. Durante la puesta en servicio de la planta El Molino se registró un desgaste hidro-abrasivo alto al cual se le hizo seguimiento posterior en las inspecciones de las 2000 y las 8000 horas de operación. Considerando la evolución de la erosión en la planta El Molino, la más acelerada de las cinco plantas en estudio, y su seguimiento detallado, se adopta su observación y registros como parámetros de referencia para el análisis del fenómeno hidro-abrasivo en este estudio. El seguimiento realizado a El Molino incluyó estudios para la caracterización del agua, sedimentológicos y morfológicos de los cual se toman elementos que hacen parte de este estudio.

4.1. Caracterización sedimentológica de la zona de influencia

La cuantificación y caracterización de los sedimentos son parámetros de gran importancia desde el punto de vista técnico y ambiental en la construcción de proyectos hidroeléctricos. En aquellos proyectos que cuentan con embalse de regulación los parámetros de caracterización se requieren por las implicaciones que tienen los sedimentos en la vida útil del embalse y los efectos sobre la dinámica fluvial aguas arriba y aguas abajo del mismo [41]. Para los proyectos tipo filo de agua donde no hay embalse de regulación, los estudios para la cuantificación y caracterización de sedimentos van orientados hacia la determinación del impacto de los sedimentos sobre la erosión en los equipos y sobre las obras civiles. En las plantas tipo filo de agua, la presencia de sedimentos y sus características determinan criterios de operación y mantenimiento relevantes en la producción de energía y la vida de los equipos.

Los estudios para la caracterización y parámetros físico-químicos (calidad) del agua requieren de la realización de aforos o toma de muestras en puntos del afluente localizados arriba de la captación (es normal usar la expresión “aguas arriba”). En mayo del 2018 se aforó el río San Matías en el sitio Puente Las Playas localizado a 1,2 km aguas arriba de la captación de la planta El Molino. Dentro de los parámetros físico-químicos analizados se encontró una concentración de sólidos suspendidos con valor de 19 mg/l. El estudio granulométrico y de distribución del tamaño de partículas identificó que los sedimentos en suspensión se encontraban dentro del rango de arcillas y arenas muy finas; el 1% de los sedimentos presentaron tamaños inferiores a 0,1 mm, el 5% por debajo de 0,065 mm límite teórico para clasificación de las arcillas [42] y el 25% por debajo de 0,03 mm. Ilustración 12

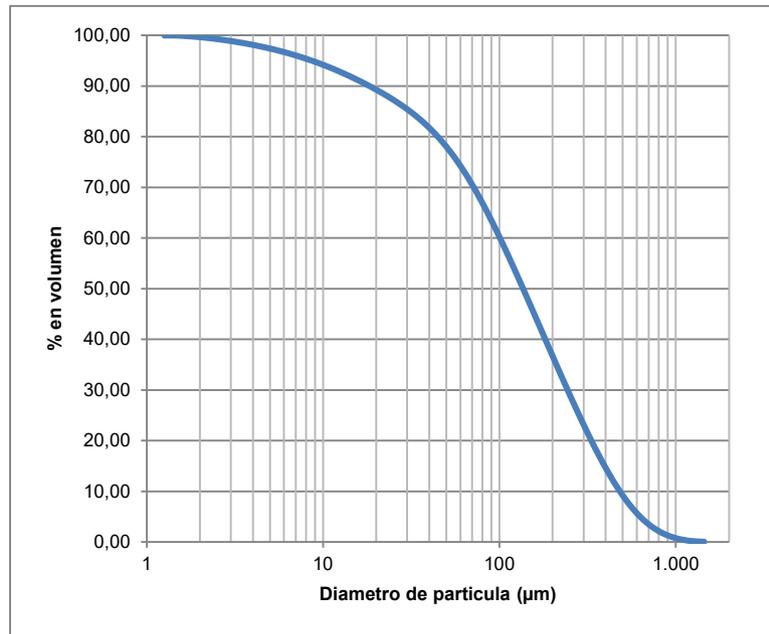


Ilustración 12 . Curva granulométrica sedimento en suspensión (15/08/2018). Tomado de [42].

El análisis mineralógico de los sedimentos en suspensión indicó una fracción superior al 59% de minerales cuya escala de dureza era superior a 5 Mohs, encontrándose predominante el cuarzo en 47,8% con escala de dureza de 7 Mohs siguiendo la hornblenda en 11,4% con dureza entre 5-6 Mohs y otros minerales con dureza inferior.

Los análisis morfológicos de las muestras indicaron características sub-angulares dominantes en los granos.

En la misma zona de influencia del Batolito antioqueño se realizaron otros aforos para el análisis de muestras. En el año 2013, aguas abajo de la captación de El Molino en el río Calderas, se realizaron tres campañas de aforos. Los datos indicaron similitud en los diámetros característicos de las curvas granulométricas de los sedimentos en suspensión de los ríos San Matías y Calderas. El informe de distribución morfológica y granulometría indicó que las muestras tomadas en las diferentes campañas presentan

porcentajes significativos de sedimentos entre 0,01 a 0,09 mm de diámetro que se clasifican como granos medios y finos de acuerdo con ISO-4365 [34].

Los tamaños de partículas encontrados en los aforos de Calderas y San Matías son considerablemente menores a la capacidad de retención de los desarenadores, es decir, estos sedimentos son transportados por el flujo y logran llegar hasta las turbinas.

Los desarenadores de proyectos tipo de filo de agua generalmente usan el principio funcional de decantación para retener partículas. Las partículas más pequeñas requieren mayor tiempo de permanencia en el tanque sedimentador para lograr decantarse. Es por esto, que los proyectos hidroeléctricos tienen limitaciones espaciales y económicas para construir las obras civiles que logren retener las partículas más pequeñas.

Tabla 4. Tamaño de partículas para los cuales se diseñaron los desarenadores de los proyectos en estudio, fuente HMV Ingenieros LTDA

PROYECTO	CAUDAL (m ³ /s)	SALTO BRUTO (m)	TAMAÑO DE PARTÍCULA (mm)
Caruquia	6,35	177,6	0,3
Guanaquitas	6,55	173,6	0,3
El Popal	13,8	159,5	0,3
El Molino	10	246	0,25

Similarmente a los análisis del río San Matías, los estudios en el río Calderas mostraron una fracción importante de minerales como cuarzo 14,5% con dureza 7 Mohs, albita 9,2 % con dureza entre 5,5 a 6,5 Mohs, hornblenda 7% con dureza entre 5,0 a 6,0 Mohs; porcentajes y durezas de partículas que indican procesos de alta erosión en las turbo-máquinas.

4.2. Materiales

Los materiales usados para la confección de los equipos corresponden con los estándares modernos de fabricación. Brekke en [36] hace un aparte sobre los materiales que se usan actualmente. La Tabla 5 relaciona los materiales usados en la fabricación de los componentes del equipo y de interés para este estudio. La Tabla 6 relaciona las propiedades mecánicas mas relevantes de los aceros utilizados, entre ellas la resistencia a la fluencia (S_y), Su resistencia última (S_u), ductilidad (Elong), dureza en escala Brinell (HB).

Tabla 5. Materiales usados en la confección de los componentes de turbinas (rodete, álabes directrices, placas de desgaste) de los proyectos en estudio. Fuente HMV Ingenieros LTDA.

PROYECTO	MATERIAL				
	RODETE	Z RUNNER BLADE	ALABES DIRECTRICES (WICKETGATES)	Z WG	PLACA DE DESGASTE (FACING PLATES)
EL MOLINO	ASTM A743 CA6NM	13	ASTM A743 CA6NM	16	AWS ER 309 (CRNI 24-13)
SAN MATÍAS	ASTM A743 CA6NM	13	ASTM A743 CA6NM	16	AWS ER 309 (CRNI 24-13)
EL POPAL	GX 4 CRNI13-4 +QT1	15	GX 4 CRNI13-4 +QT1	20	X2CRNIMON22-5-3
GUANAQUITAS	GX 4 CRNI13-4 +QT1	15	GX 4 CRNI13-4 +QT1	20	X2CRNIMON22-5-3
CARUQUIA	GX 4 CRNI13-4 +QT1	15	GX 4 CRNI13-4 +QT1	20	X2CRNIMON22-5-3

Tabla 6. Propiedades mecánicas de los aceros referenciados en la Tabla 5

PROPIEDADES MECÁNICAS				
MATERIAL	S_y [M.PA]	S_u [M.PA]	ELONG [%]	DUREZA [HB]
ASTM A743 CA6NM	550	755	15	285
GX 4 CRNI13-4 +QT1	687	760	21,3	285-290
X2CRNIMON22-5-3	550	760	15	240-300
AWS ER 309 (CRNI 24-13)	450	595	42	205

4.3. Factores de operación

La planta El Molino arrancó pruebas de puesta en servicio y operación comercial en mayo de 2017, período característico por ser temporada de invierno en la zona, con eventos de crecientes repetidas en la cuenca. La carga sedimentaria transportada por el río San Matías se eleva con las crecientes y logra llegar al tanque sedimentador. El programa establecido para las descargas de fondo no previó la cantidad de sedimentos transportados al desarenador, ocasionando una sobrecarga de sedimentos decantados a lo largo de sus cámaras. Durante las inspecciones del desarenador se evidenció una alta carga de partículas decantadas que no lograba ser descargada por la estructura civil. La Ilustración 13 a) y b) muestra registros de la inspección luego de la primera descarga de fondo de las cámaras del desarenador. Posteriormente, en junio de 2017 durante una parada programada, se drenó el tanque de carga de San Matías que recibe las aguas

turbinadas de El Molino. Una vez vacío el tanque se encontró una gran cantidad de sedimentos alojados en zonas de baja velocidad del flujo. La Ilustración 13 c) corresponde al registro fotográfico en el tanque de carga de San Matías durante esta inspección.

Las evidencias permitieron concluir que las cámaras del desarenador se colmataron de sedimentos debido a: la carga sedimentaria que aportaba el río, y la baja frecuencia de mantenimiento del desarenador. Los altos niveles de sedimentos decantados en las cámaras del desarenador reducen su área de flujo aumentando la velocidad del mismo y disminuyendo la capacidad de decantación del desarenador. Los niveles altos de sedimentos decantados y la mayor velocidad del flujo generan arrastre y resuspensión del material decantado. Finalmente, toda la carga de sedimentos suspendida en el caudal captado, más la resuspensión de sedimento, se transporta a la conducción y llega a las turbinas de las plantas El Molino y San Matías.



Ilustración 13 . Sedimentos decantados, a) y b) sedientos en canales del desarenador de El Molino, c) sedimentos decantados en el tanque de carga de San Matías. Tomado de archivos del autor.

En marzo de 2018 se realizó la calibración del distribuidor del regulador de velocidad de la unidad generadora UG1 de la planta El Molino. Esa calibración consiste en ajustar la orientación de los álabes directrices de manera que, en posición “cerrado” del distribuidor, la cola y la cabeza de dos álabes directrices sucesivos queden en contacto.

El operador hizo el requerimiento de calibración como consecuencia de la pérdida de estanqueidad hidráulica del distribuidor cerrado en la cámara espiral. Esta estanqueidad garantiza la exigencia de equilibrio de presiones aguas arriba y aguas abajo de la válvula de guarda para iniciar la secuencia de arranque y operación de la turbina. La pérdida de estanqueidad en el distribuidor cerrado se debe a las fugas hidráulicas que son causadas por las siguientes razones:

- El movimiento relativo de uno o varios álabes respecto de su *set point* de cierre.
- El rompimiento de álabes, bielas o fusibles del mecanismo de distribución.
- La pérdida de material de los componentes del equipo debido al desgaste hidro-abrasivo por sedimentos suspendidos en el agua. La hidro-abrasión genera una ampliación de los espacios tolerados de los pasajes hidráulicos entre los álabes directrices y las placas de desgaste. El desgaste erosivo también reduce el tamaño de los álabes directrices evitando el contacto de cierre y la estanqueidad del *set point* de la máquina. La Ilustración 14 sugiere el detrimento de la estanquidad en el distribuidor a partir de la pérdida de material en los perfiles originales, debido al desgaste hidro-abrasivo.

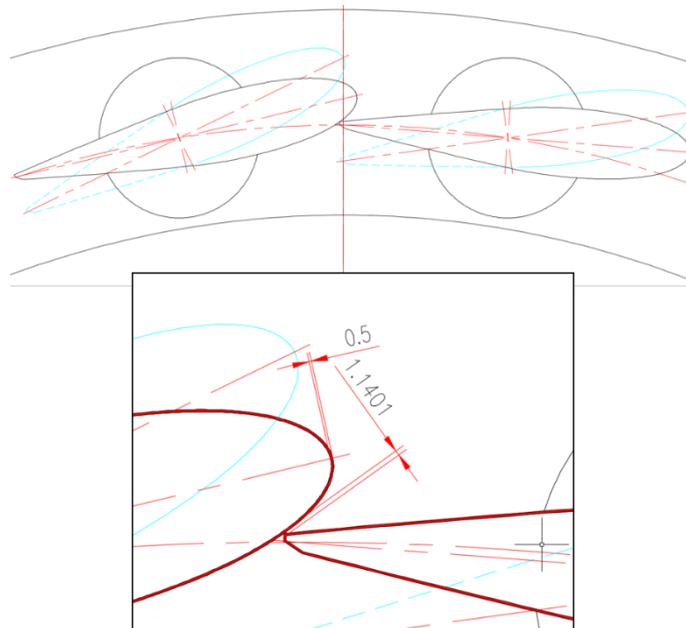


Ilustración 14 . Esquema de dos álabes directrices sucesivos en posición del distribuidor cerrado y abierto, el detalle indica la simulación del desgaste hidro-abrasivo sobre las superficies hidráulicas de los álabes y que generarían la pérdida de estanqueidad en el distribuidor.

El detalle del contacto entre cabeza y cola de dos álabes directrices en la Ilustración 14 sugiere una pérdida de material de la superficie hidrodinámica de los elementos a causa de la hidro-abrasión. Suponiendo una pérdida uniforme de espesor 0,5 mm de la superficie hidrodinámica, se crea una holgura de 1,14 mm entre la cabeza y cola de dos álabes directrices sucesivos. Este aumento en el pasaje hidráulico genera la pérdida de estanqueidad para lograr el equilibrio de presión requerido en la secuencia de arranque.

Las holguras reportadas en la inspección y calibración del distribuidor en marzo de 2018 presentaron valores promedio de 1,1mm y máximos de 3,86 mm. Los detalles se presentan en el siguiente numeral.

En el numeral 3.4 se introdujo el concepto de la generación de mayores vórtices, turbulencias, flujos secundarios, aceleración del flujo en los álabes directrices y pasajes con las placas de desgaste cuando se genera a cargas parciales. En cargas parciales y en presencia de sedimentos, el flujo se torna altamente erosivo. Primero se forman cavidades por la hidro-abrasión que modifican las formas hidráulicas, incluso las que son libres de cavitación. Como consecuencia se induce la sinergia entre la erosión de arena y la erosión por cavitación, acelerando el proceso de daño en los elementos.

En [36] y [31] se reporta el estudio del efecto acoplado de la erosión hidro-abrasiva y la cavitación sobre un espécimen de acero inoxidable. El experimento se realizó durante 4,5 horas con velocidad de flujo de 39 m/s y tamaño de partículas de arena entre 90-212 micrones. El registro fotográfico en función del tiempo se muestra en la Ilustración 15.

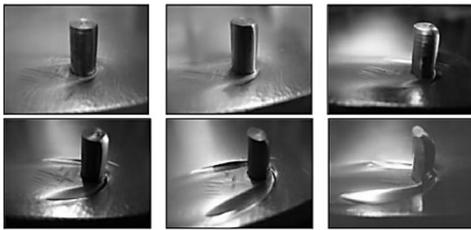


Ilustración 15. Erosión progresiva causada por el efecto combinado de erosión por arena y la cavitación. Secuencia de fotos en 30 min, 45 min, 60 min, 180 min y 270 min, tomado de [36] y [31].

La imagen muestra el patrón progresivo de erosión mixta en los tiempos 30 min, 45 min, 60 min, 90 min, 180 min y 270 min. La erosión inicia profundizando el patrón de herradura o *horse-shoe* que posteriormente induce la cavitación. A medida que transcurre el ensayo, la ranura de erosión en la placa se profundiza y se propaga aumentando el área erosionada mientras que el pin sufre desgaste hidro-abrasivo. El patrón de erosión es idéntico al que presentan los álabes directrices y placas de desgaste de las turbinas Francis en estudio.

La prueba ilustra como en pocos minutos la erosión desgasta el metal. El experimento refleja el paso del flujo a través de los álabes directrices y placas de desgaste en condiciones normales de operación y presencia de sedimentos. Para condiciones de operación a carga parcial, como se menciona en el numeral 3.4, se presentan todas las circunstancias que conducen a una mayor hidro-abrasión.

Los registros de operación de la planta El Molino indican que en el mes de abril de 2017 se generó a carga parcial durante periodos prolongados. Algunos eventos relevantes: durante el día 14 se generó una hora continua

a un máximo de 5,12 MW y un mínimo de 4,54 MW; entre los días 17 y 18 se generó durante 8 horas continuas a un promedio de 6,35 MW con un mínimo de 5,02 MW; el día 18 se generó durante 13,5 horas continuas a un promedio de 5,75 MW con un mínimo de 4 MW.

4.4. Inspecciones de garantía

Las inspecciones de garantía permiten tomar datos, medidas y registros de las máquinas a un nivel muy detallado. Las inspecciones programadas se realizan en el cumplimiento horario operacional de 2000h, 4000h y 8000h. Posteriormente se hacen inspecciones de mantenimiento a las 16000h y 24000h.

La secuencia de imágenes identificada en la Ilustración 16 detalla la evolución del desgaste erosivo en la zona de interrelación de la placa de desgaste del lado de descarga con los álabes directrices. Se destacan las posiciones 1/20 y 9/20 del regulador de velocidad de la planta Caruquia. Los registros de izquierda a derecha son tomados en las inspecciones siguientes: 8000 horas de operación (9/2011), 16000 horas de operación (5/2012), 24000 horas de operación (5/2013) e inspección programada posteriormente (1/2014). El primer registro en Caruquia corresponde a las 8000 horas de operación.

En la Ilustración 17 se muestra la secuencia de registros fotográficos y la evolución del desgaste erosivo en la zona de interrelación de la placa de desgaste del lado de generador en posiciones 1/16 y 2/16 del regulador de velocidad de la unidad UG 1 de la planta El Molino. Los registros de izquierda a derecha son tomados en las inspecciones siguientes: los dos primeros, el de la izquierda y el del centro, fueron obtenidos en la calibración de álabes del regulador de velocidad (3/2018); el registro del lado derecho fue obtenido en la inspección de 8000 horas (7/2018).

Las máquinas de Caruquia y El Molino presentan un desgaste erosivo clásico en la zona de interface entre álabes directrices y placas de desgaste, lo que es correspondiente con los argumentos indicados en el numeral 3.4. Las dimensiones de muñones y álabes directrices son similares para ambos proyectos.

En Caruquia se levantan registros de desgaste erosivo desde las 8000 horas de operación mientras que El Molino tiene su primer registro cerca de las 2000 horas de operación.

Tanto en Caruquia como en El Molino se presentan: erosión por turbulencia, erosión por flujo secundario, erosión por fugas, erosión por aceleración del flujo.

En El Molino, a las 2000 horas, se identifica erosión mixta hidro-abrasiva/cavitación en placas de desgaste y álabes directrices. La evolución de este desgaste entre las 2000 horas y 8000 horas no parece ser proporcional ni significativa con respecto al primer periodo.

En Caruquia, a las 8000 horas, se encuentra adicionalmente erosión por impactos de sólidos grandes tanto en placas de desgaste como en álabes directrices.

La evolución de la erosión hidro-abrasiva en área proyectada, identificada a las 8000 horas, es más pronunciada en Caruquia que en la respectiva inspección de El Molino. La profundidad en los perímetros de los muñones también fue mayor para Caruquia que para El Molino. Ambos proyectos presentan erosión de tipo *horse-shoe* o patrón de herradura. En El Molino se pronuncia la huella de desgaste en posición del álabes directriz a carga parcial. También se identifican marcas hondas debidas a la erosión por fugas en la placa de desgaste del lado de descarga (inspección 2000 horas), Ilustración 18.

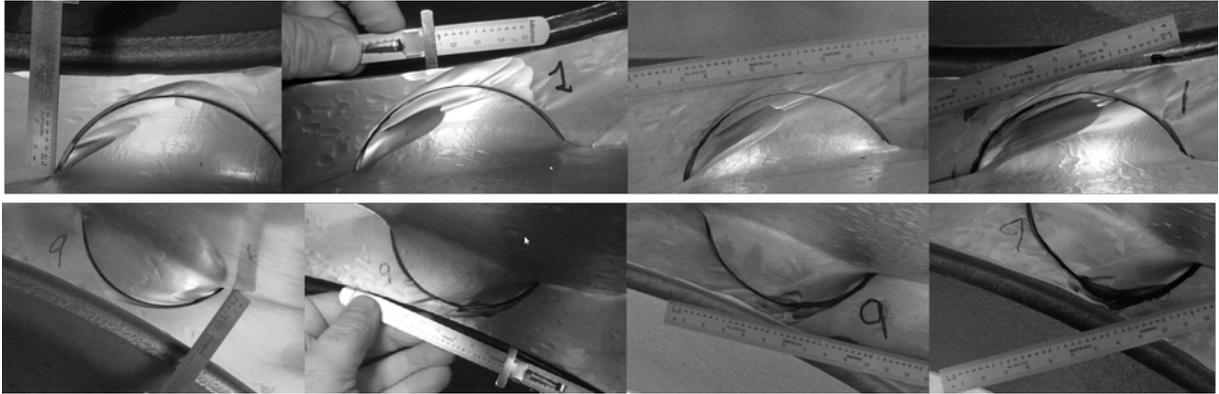


Ilustración 16. Erosión progresiva causada por el efecto combinado de erosión por cavitación e hidro-abrasión. Registros fotográficos del autor

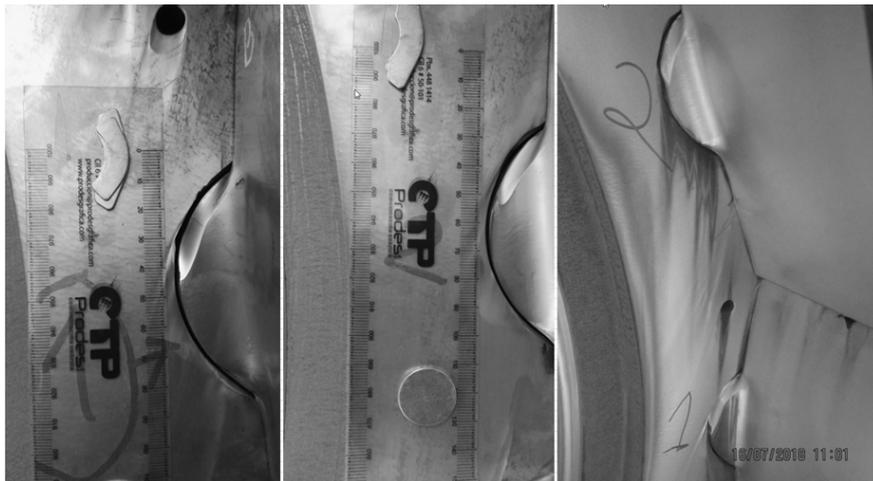


Ilustración 17. Desgaste erosivo en álabes directrices y placa de desgaste, El Molino, 2000h y 8000h. Registros fotográficos del autor

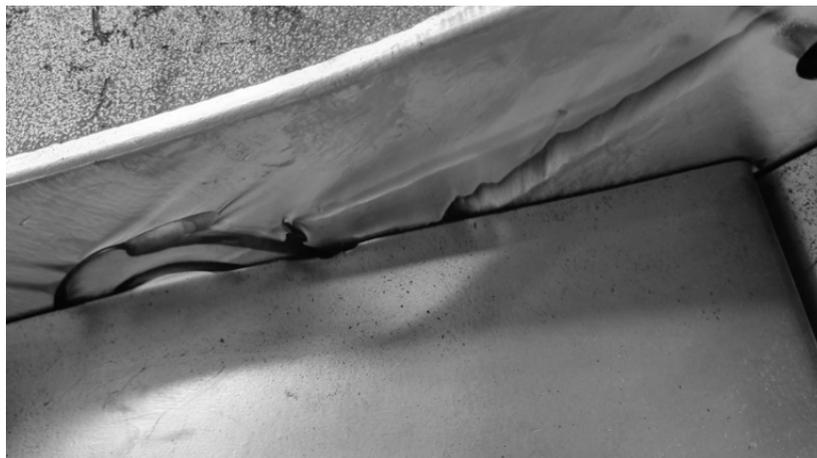


Ilustración 18. Desgaste erosivo en placa de desgaste del lado de descarga, El Molino. Registros fotográficos del autor.

La **Ilustración 19** señala gráficamente los puntos de calibración del álabe directriz y los datos tabulados con su respectivo análisis. Los resultados obtenidos corresponden a las inspecciones de 2000 h y 8000 h de operación. En los puntos de calibración A, B, F, G se miden las holguras entre el álabe directriz y las placas de desgaste del lado de generador y del lado de descarga. En los puntos de calibración E, D y C se miden las holguras entre cabeza y cola de álabes directrices sucesivos y en posición de cierre del distribuidor. En la tabulación los encabezados A+G y B+F corresponden a la holgura total entre cabeza y cola de los álabes directrices; las columnas de la tabla contienen la siguiente información:

- Diseño: medida de diseño que presenta una holgura de 0,2 mm por lado, en total 0,4 mm.
- 2000 h y 8000 h: medidas de holgura obtenidas en las inspecciones respectivas y que fueron reportadas por Voith y las inspecciones de HMV.
- $\Delta d2$ y $\Delta d8$: holguras absolutas debidas al desgaste erosivo (no incluyen la holgura del diseño).

- $\Delta d2-8$: holgura relativa debida a la erosión durante el periodo 2000 y 8000 horas de operación.

Es importante anotar las recomendaciones de holgura indicadas en la literatura técnica. Por ejemplo Brekke [36], indica que para minimizar el flujo de fuga y flujo secundario entre álabes directrices y placas de desgaste, se debe dejar una tolerancia baja, cerca de 0,5mm y no menor a 0,1mm, ya que las tolerancias menores generan abrasión y engarrotamiento entre las partes fijas y móviles. Para esto la placa de desgaste se mejora con recubrimientos o elementos reemplazables, pero con dureza inferior al álabe directriz para evitar el engarrotamiento de las superficies. Brekke [36] pone un ejemplo de combinación habitual donde la dureza de placas de desgaste es el 75% de la dureza de álabes directrices. En el caso de El Molino la diferencia en dureza de las placas de desgaste respecto de los álabes directrices es de 72% mientras que en Popal, Caruquia y Guanaquitas la diferencia no es sustancial.

Posición	A+G [mm]						B+F [mm]						
	Álabe	diseño	2000 h	$\Delta d2$	8000 h	$\Delta d8$	$\Delta 2-8$	diseño	2000 h	$\Delta d2$	8000 h	$\Delta d8$	$\Delta 2-8$
1		0,40	0,83	0,43	1,07	0,67	0,24	0,40	0,88	0,48	1,33	0,93	0,45
2		0,40	0,96	0,56	1,15	0,75	0,19	0,40	1,09	0,69	1,35	0,95	0,26
3		0,40	0,98	0,58	1,25	0,85	0,27	0,40	0,98	0,58	1,43	1,03	0,45
4		0,40	0,86	0,46	1,20	0,80	0,34	0,40	0,83	0,43	1,25	0,85	0,42
5		0,40	0,73	0,33	1,12	0,72	0,39	0,40	0,83	0,43	1,45	1,05	0,62
6		0,40	0,85	0,45	1,10	0,70	0,25	0,40	0,80	0,40	1,38	0,98	0,58
7		0,40	0,81	0,41	1,05	0,65	0,24	0,40	0,81	0,41	1,45	1,05	0,64
8		0,40	0,78	0,38	1,05	0,65	0,27	0,40	0,81	0,41	1,35	0,95	0,54
9		0,40	0,75	0,35	1,13	0,73	0,38	0,40	0,78	0,38	1,45	1,05	0,67
10		0,40	0,86	0,46	1,15	0,75	0,29	0,40	0,88	0,48	1,35	0,95	0,47
11		0,40	0,83	0,43	1,05	0,65	0,22	0,40	0,88	0,48	1,45	1,05	0,57
12		0,40	0,83	0,43	1,08	0,68	0,25	0,40	0,83	0,43	1,43	1,03	0,60
13		0,40	0,63	0,23	1,02	0,62	0,39	0,40	0,86	0,46	1,48	1,08	0,62
14		0,40	0,33	-0,07	1,08	0,68	0,75	0,40	0,91	0,51	1,43	1,03	0,52
15		0,40	0,86	0,46	1,08	0,68	0,22	0,40	0,86	0,46	1,40	1,00	0,54
16		0,40	0,83	0,43	1,08	0,68	0,25	0,40	0,91	0,51	1,30	0,90	0,39

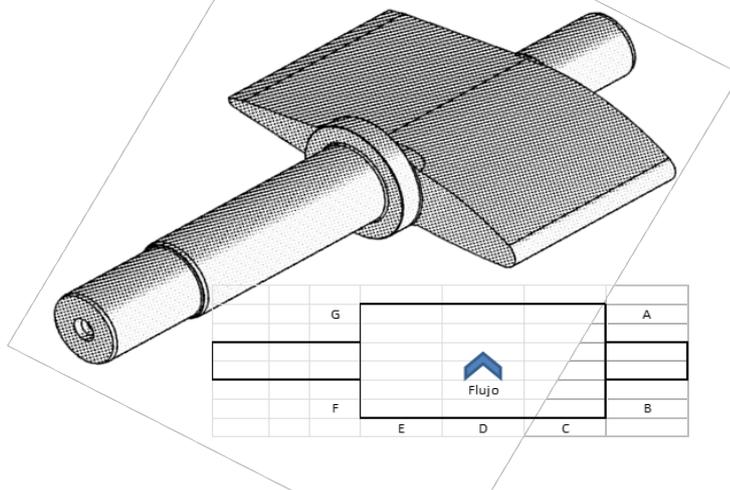


Ilustración 19. Holguras y desgastes hidro-abrasivos de álabes directrices, puntos de calibración obtenidos en periodos 2000 h y 8000 h de operación, planta El Molino.

La **Ilustración 20** corresponde al análisis de datos tabulados en la **Ilustración 19**. Los datos evaluados son los promedios de desgastes erosivos absolutos y relativos. La curva azul corresponde a la tendencia en el tiempo del desgaste erosivo. Se interpreta de ella que la erosión relativa en el periodo comprendido entre el arranque de máquina y las 2000 horas de operación es mayor al desgaste entre las 2000 horas y 8000 horas de operación. Esta tendencia marca un evidente cambio en la cantidad de sedimentos turbinados y que corresponde con las decisiones tomadas en las consignas de operación.

La curva roja corresponde a la tendencia del desgaste acumulado en el tiempo. El cambio de pendiente cerca de las 2000 horas de operación revela que hubo una disminución en la rapidez de pérdida de material por erosión respecto al período inicial, lo que sería otra forma de interpretar y corroborar lo descrito en el párrafo anterior.

Los registros de la inspección 8000 horas de operación en El Popal se tomaron en diciembre de 2014. De los cinco proyectos, la máquina de El Popal presentó el menor desgaste por hidro-abrasión a las 8000h, **Ilustración 21**.

Los datos de registros de las inspecciones de Guanaquitas son coincidentes con los de Caruquia. Esto se debe a que las consignas de

operación son similares y las condiciones hidrológicas y sedimentarias son de la misma cuenca, río Guadalupe. De manera similar ocurre con los datos de registro de San Matías. El desgaste erosivo en relación al tiempo de operación es similar al que presenta El Molino, no obstante, menor, ya que al momento de entrar la planta en operación se habían corregido consignas y criterios de operación particularmente en la operación a cargas parciales y durante crecientes.

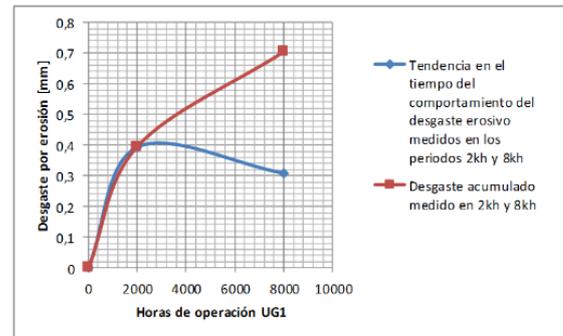


Ilustración 20. Desgaste erosivo en álabes directrices y placas de desgaste, planta El Molino.



Ilustración 21 . Registros de placa de desgaste, y álabes directrices de El Popal, 8000 h de operación; a) conjunto placa de desgaste lado del generador y turbina, b) calibración de holgura de álabes directrices y placa de desgaste. Fuente [43]

5. Discusión y conclusiones

Colombia está en una región de grandes recursos hidrológicos y geográficos disponibles para el aprovechamiento de la generación hidroeléctrica. De acuerdo a las proyecciones de crecimiento de la matriz energética de Colombia en los próximos 4 años se aumentará la generación producida por plantas menores y pequeños aprovechamientos hidroeléctricos de 1,4 GW a 3 GW, lo que enmarca un reto importante en la atención a las condiciones de operación de las plantas en presencia de sedimentos. El espectro del reto abarca desde la concepción misma de los proyectos, seguido de la ingeniería y especificación de los equipos, así como de las obras civiles, continuado con la operación y mantenimiento de las plantas. Este estudio presentó características de cinco proyectos similares que han sufrido en mayor y menor medida el desgaste hidro-abrasivo debido a los sedimentos transportados. Como consecuencia se establecieron paralelos de comparación que ayudan a entender el fenómeno de erosión y los parámetros que lo afectan.

Los registros tomados durante las inspecciones de las plantas revelan que hay una incidencia alta en el desgaste hidro-abrasivo de las turbomáquinas debida a la forma de operación de las plantas. La operación a carga parcial, por debajo de los límites que sugiere el diseñador/fabricante, deben evitarse. Las cargas parciales generan discontinuidad del flujo, reducción de eficiencia y erosión por cavitación, que en presencia de sedimentos crean una erosión mayor que la suma de las erosiones producidas independientemente por los dos fenómenos.

Las operaciones durante crecientes deben evitarse. No será difícil comprobar que el costo por el desgaste de la máquina debido a la erosión en un período corto de crecientes es mayor que los ingresos no logrados por generar en ese mismo tiempo. Por otro lado, el desgaste erosivo conlleva a una pérdida de eficiencia del equipo que evaluado en años representa una reducción importante de la rentabilidad del proyecto.

La operación prolongada en presencia de sedimentos ocasiona una reducción acelerada de la vida de la máquina, pérdida de eficiencia y en casos extremos disminución de la estabilidad estructural del equipo. En el caso de El Molino, el desgaste erosivo máximo se alcanzó durante el período de puesta en servicio. Durante ese período la erosión provocó una pérdida cercana a 1 mm de espesor en los álabes directrices (500% de la holgura de diseño).

La concepción de los proyectos y su evaluación financiera debe prestar atención especial a las condiciones geomorfológicas e hidrográficas que incidan en la carga sedimentaria y sus características de erosión. Existen registros de proyectos concebidos con un mínimo o ningún estudio

mineralógico e hidrológico asociado a los sedimentos, la diferencia entre hacer o no estos estudios puede significar la inviabilidad de un proyecto.

Otro factor de gran impacto en la erosión de las turbo-máquinas es la velocidad y aceleración del flujo al paso del distribuidor hacia la turbina. La velocidad se debe a la cabeza de operación; mientras mayor sea la cabeza mayor será la velocidad absoluta del flujo al paso por los álabes directrices. La velocidad aumenta la energía en las partículas que colisionan y erosionan las superficies de la turbina. Además, genera vórtices, separación de capa límite, flujos cruzados y secundarios etc., todos ellos fenómenos que inciden en la hidro-abrasión.

Proyectos con condiciones de operación de alta cabeza y alta velocidad sincrónica son más propensos al desgaste erosivo que otras plantas de menor cabeza y velocidad sincrónica. Especialmente se identifica este efecto en los pasajes de las turbomáquinas donde se genera mayor velocidad de flujo como consecuencia de la mayor cabeza. En condiciones similares de calidad de agua y de consignas de operación, la planta que tenga mayor cabeza y velocidad sincrónica sufrirá más desgaste erosivo que una con menores valores.

Los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos con captación a filo de agua son más susceptibles al fenómeno de erosión por hidro-abrasión debido a que las cargas sedimentarias transportadas por el río ingresan directamente a la conducción del proyecto. Por ello que es habitual que este tipo de proyectos tenga incorporada una estructura civil de decantación de sedimentos, sedimentador o desarenador.

Pese a que los desarenadores atrapan partículas pequeñas del orden de 0,25 mm y mayores, partículas de menor tamaño logran pasar hasta la turbina representando un riesgo de daños severo a las máquinas. Son especialmente peligrosas las partículas que tienen alta dureza y formas angulares o sub-angulares.

La selección adecuada de los materiales de turbina es importante, sin embargo, en condiciones de hidro-abrasión ningún acero es resistente. Si es el caso deben adoptarse recubrimientos y procesos especiales en los elementos rotantes y estacionarios susceptibles a la erosión.

Los aceros inoxidables tienen excelente resistencia mecánica a la cavitación y a esfuerzos de fatiga típicos de situaciones normales de operación permanente. Sin embargos estos materiales no son apropiados para condiciones de operación en presencia de sedimentos.

Las operaciones con altas cargas de sedimentos pueden llegar generar la pérdida del equilibrio de presión necesaria en la secuencia de arranque de las turbomáquinas.

Agradecimientos

El presente estudio se realizó con información derivada de actividades de inspección, análisis y mantenimientos en las que participé como Ingeniero Especialista del grupo de Generación Hidráulica de la empresa HMV Ingenieros Ltda. Deseo agradecer el soporte y la autorización para publicar datos específicos de los proyectos en estudio a HMV Ingenieros LTDA, empresa consultora, y LAREIF I, S. DE R.L., operador de las plantas; también y de manera particular agradecer a todas las personas que apoyaron esta iniciativa entre ellas: Dr.-Ing. Francisco Botero – Coordinador Doctorado en Ingeniería Universidad EAFIT Colombia, por su tutoría y aportes durante todo mi proceso maestrando; Ing. Lina María Arango Coordinadora de la Unidad de Negocio Generación Hidráulica – HMV Ingenieros, mi jefe que ha apoyado mis iniciativas de formación; a mi esposa Mónica y mi hija María José, por su paciencia y amor.

Referencias

- [1] M. D. Rodríguez, "SECTOR ELÉCTRICO ISNN 2215-762X," 2010.
- [2] A. ; C. ; Dorado, J. ; Guzmán, and D. ; Ruiz, "Climatología Trimestral de Colombia."
- [3] "Atlas Interactivo - Climatológico - IDEAM." [Online]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>. [Accessed: 03-Sep-2019].
- [4] L. R. Albuquerque *et al.*, *The Power of Rivers A Business Case*, McGill Uni. 2017.
- [5] "Renovables no convencionales en el SIN." [Online]. Available: <https://www.xm.com.co/Paginas/Renovables/Renovables-no-convencionales-en-el-SIN.aspx>. [Accessed: 01-Sep-2019].
- [6] C. de R. de E. y Gas, *Resolución N°086/96 Miniestrios de Minas y Energía*. Colombia, 1996, p. 4.
- [7] "Weblet Importer." [Online]. Available: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resolución-1996-CRG86-96>. [Accessed: 01-Sep-2019].
- [8] "Weblet Importer." [Online]. Available: <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>. [Accessed: 01-Sep-2019].
- [9] J. D. Restrepo and H. A. Escobar, "Sediment load trends in the Magdalena River basin (1980–2010): Anthropogenic and climate-induced causes," *Geomorphology*, vol. 302, pp. 76–91, 2018.
- [10] J. D. Restrepo, "Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia," *J. Hydrol.*, vol. 316, no. 1–4, pp. 213–232, Jan. 2006.
- [11] A. K. RAI and A. KUMAR, "Analyzing hydro abrasive erosion in Kaplan turbine: A case study from India," *J. Hydrodyn.*, vol. 28, no. 5, pp. 863–872, 2016.
- [12] P. Finnegan, "Gm Shrum Generating Station G3 Runner Failure Technical Analysis and Recommendations," no. 3698500, pp. 1–109, 2008.
- [13] J.-M. CHAPALLAZ, *Turbines hydrauliques journées de formation pour ingénieurs : petites centrales hydrauliques*. Berne, Office fédéral des questions conjoncturelles, 1995.
- [14] HMV, "Diseño Campaña de Agua y Sedimentos río San Matías," Colombia, 2018.
- [15] I. E. Commission, "IEC 60609-1:2004 Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Cavitation pitting evaluation - Part 1: Evaluation in reaction turbines, storage pumps and pump-turbines," *International Standard*. p. 41, 2004.
- [16] UPME, "Atlas Potencial Hidroenergéticos de Colombia, Hidroenergía Capítulo 1," 2015.
- [17] USAENE, "Evaluar y proponer los criterios y características de los posibles desarrollo de energía de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos de acuerdo con lo definido en la Ley 1715 de 2014 para ser catalogados con FN CER, considerando el entorno del mercado elé," 2017.
- [18] ASME, *The guide to hydropower mechanical design : prepared by the American Society of Mechanical Engineers Hydro Power Technical Committee*. 1996.
- [19] HMV Ingenieros, "Estudio de Caudales Medios, Máximos y Mínimos en la Cuenca alta del río Guadalupe,," Colombia, 2006.
- [20] Servicio Geológico Colombiano, "Visor de Datos Geográficos." [Online]. Available: https://svags.sgc.gov.co/JSViewer/Visor_Integrado_Geoportal/. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [21] A. I. No, "GEOLOGIA DE LA PLANCHA 147 MEDELLÍN ORIENTAL."
- [22] G. Rodríguez, H. González, and G. Zapata, "Geología De La Plancha 147 Medellín Oriental," *Serv. Geológico Colomb.*, p. 1403, 2005.
- [23] H. Abarracín *et al.*, "Plancha 131 - Santa Rosa de Osos. Mapa Geológico. Escala 1:100.000," p. 1, 2010.
- [24] L. Geológica, "PLANCHA 132 - Yolombó 1.240.000," p. 3215, 2008.
- [25] T. Feininger, D. Barrero, and N. Castro, "GEOLOGÍA DE PARTE DE LOS DEPARTAMENTOS DE ANTIOQUIA Y CALDAS (SUB-ZONA II-B) Memoria Explicativa," *Inst. Colomb. Geol. y Minería Ingeominas*, pp. 2–3, 1970.
- [26] H. Albarracín *et al.*, "Memoria Explicativa del Mapa Geológico de la Plancha 131 Santa Rosa de Osos," p. 262, 2011.
- [27] D. Felix, I. Albayrak, A. Abgottspon, and R. M. Boes, "Hydro-abrasive erosion of hydraulic turbines caused by sediment - A century of research and development," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 49, no. 12, 2016.
- [28] IEC, "IEC 62364 Standards Publication Hydraulic machines — Guide for dealing with hydro- abrasive erosion in Kaplan , Francis , and Pelton turbines," 2013.
- [29] IEC, "Technical Report IEC TR61364 - Nomenclature for hydroelectric powerplant machinery,," 1992.
- [30] V. Y. Karelin, *Abrasive Erosion and Corrosion of Hydraulic Machinery*, vol. 2. 2003.
- [31] B. Thapa, "Sand Erosion in Hydraulic Machinery," 2004.
- [32] H. P. Neopane, "Sediment erosion in hydro turbines," *Ph.D. thesis*, no. March, p. 201, 2010.
- [33] S. Bahadur and R. Badruddin, "Erodent particle characterization and the effect of particle size and shape on erosion," *Wear*, vol. 138, no. 1–2, pp. 189–208, 1990.
- [34] ISO, "ISO 4365 - Liquid flow in open channels — Sediment in streams and canals — Determination of concentration, particle size distribution and relative density Measure," Switzerland, 2005.
- [35] B. Thapa, "Sand Erosion in Hydraulic Machinery," 2004.
- [36] H. Brekke, "HYDRAULIC TURBINES Design, Erection and Operation," 2001.
- [37] B. Thapa, "Sand erosion in hydraulic machinery," 2004.
- [38] H. Brekke, Y. L. Wu, and B. Y. Cai, "Design of Hydraulic Machinery Working in Sand Laden Water," 2003, pp. 155–233.
- [39] H. Cheng *et al.*, "Hydraulic analysis and optimization design in Guri rehabilitation project," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 49, no. 10, 2016.
- [40] B. Thapa, P. Chaudhary, O. G. Dahlhaug, and P. Upadhyay, "Study of Combined Effect of Sand Erosion and Cavitation in Hydraulic Turbines," *Int. Conf. Small Hydropower*, no. October, pp. 22–24, 2007.
- [41] HMV Ingenieros, "Informe Hidrológico Proyecto Hidroeléctrico Popal - 2148-06-HY-RP-010-R2," 2009.
- [42] HMV Ingenieros, "Reporte de Resultados de la Campaña de Aforos - PCH El Molino," Colombia, 2018.
- [43] ANDRITZ Hydro, "Informe supervisión en inspección antes de las 8000 horas en servicio de la P.C.H. El Popal," 2015.