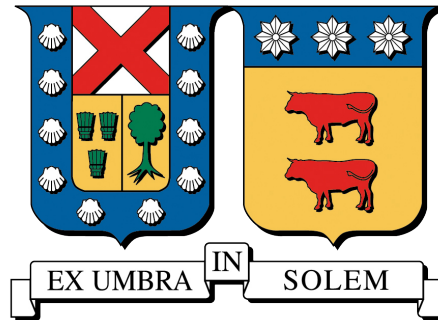


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE



**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO Y PROPUESTA DE INNOVACIÓN PARA
BATERÍAS DE HIDROCICLONES EN PLANTAS CONCENTRADORAS**

FELIPE ESTEBAN ESCOBAR VARELA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : ING. RAFAEL MENA YANSSEN
PROFESOR CORREFERENTE : DR. ING. CHRISTOPHER COOPER VILLAGRÁN

Abril 2019

A mis Padres...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres (Patito y Lalita) y a mis hermanos (Morrito y Cristián) por haberme acompañado los años que estuve en Valparaíso, que cuando los necesitaba, no dudaban en tomar el auto o bus y viajar un fin de semana, o tan solo por el día para vernos. Fueron de tremendo apoyo anímico antes, durante y después de que me operaran la rodilla. . . me motivaron a hacer mi día como si nada hubiese pasado (*siempre foerte, nunca infoerte*). Los amo con toda mi alma y corazón. Diana, gracias por tu tiempo y aporte en este trabajo, por haberme acompañado y motivado a continuar. . . te quiero mucho.

A mis compañeros y amigos sansanos que hicieron de la universidad un lugar muy grato de estar. A Rodrigo, Fran y Marcos por sus tardes/noches de estudio (más distracción que estudio en verdad) de gran aporte al común objetivo. A los compañeros de las pensiones: Los Chanchísimos de San Luis (apañando siempre al *tres por luca*) y Bari de Don Marino (*Don Pirata*). Con ustedes aprendí que compartir, cantar, reír y por sobretodo comer son los elementos esenciales para lograr una buena convivencia. A mis amigos Cristóbal y Camilo (Comisión Vivaldi) que compartimos todos los años, hasta hoy, acompañándonos. Mención honrosa al traficante de Panchitos, el Juan, con el que compartí un solo semestre como *roomie* pero que hasta hoy me acuerdo de su desorden y datos freak que a nadie le interesan. A la Rama de Rugby, que me enseñó a trabajar en equipo y a nunca estar solo. A Nicole, Chilote y Jo por haberme delegado la continuidad y dirección de Difusión Mecánica (gracias por confiar) y a Consuelo y Rafita por haberlo continuado. A Paola por siempre darse un tiempo para conversar y comer.

Gracias a los profesores Mena y Cooper, a ambos por haber creído en este tema, por su paciencia e ideas para llevar a cabo las propuestas de esta memoria. A todos los profesores que acompañaron mi formación académica, la que me entregó las herramientas necesarias para afrontar los desafíos de la industria. Gracias a BHP y Escondida por permitirme desarrollar la memoria en paralelo mientras trabajaba. A Alex por haberme propuesto el tema inicial y por darme clases de procesos, a Jarur y Pablo por haberme ayudado con el *Uniformance* y por mostrarme las muchas cosas que podemos hacer para mejorar los procesos. Al equipo de Operaciones por sus capacitaciones en terreno. Al gran equipo de Mantenimiento CLS, con el que comparto siete días de la semana. . . Ángel, Nicolás, Fran y Jenaro, por su tremendo apoyo, enseñanzas y educación como supervisor. Gracias por hacer el turno mucho más llevadero y entretenido. Sin lugar a dudas, toda la concentradora está conformada por un tremendo equipo de profesionales, es un orgullo trabajar allí.

Finalmente, gracias a Valparaíso (amado Valpito), ciudad que pasó del odio al amor, un gusto adquirido. Agradezco los últimos tres años en Placeres, donde mi pieza tuvo un balcón con vista al puerto y a los cerros, donde abría todas las mañanas el ventanal para que entrase el aroma del café que era transportado desde el centro por el viento. Despertar más de una vez por el fuerte golpe de miles de gotas de agua de una tormenta, también haber despertado por una sinfonía de relámpagos y truenos. . . espectáculos gratis. Recuerdo cuando necesitaba despejarme o reflexionar, me sentaba en la terraza por 20 minutos a mirar tus verdes cerros, a ver los barcos que llegaban al puerto y en las noches a ver y sentir las estrellas. Salir a andar en bici en las tardes, para culminar con anaranjados ocasos. Simplemente agradecido de ti. . . tremenda experiencia vivida.

RESUMEN

Día a día la industria del cobre debe ir optimizando sus procesos en el ámbito operativo y de mantenimiento, para lograr así mejoras y automatizaciones con el fin de disminuir costos de producción, hacer una operación más segura para las personas, mejorar la recuperación de cobre y apalancar de cierta forma el descenso de la ley de cobre, que es la tendencia actual y a futuro.

El foco de estudio en este trabajo son las baterías de hidrociclones de la Planta Concentradora Laguna Seca en Minera Escondida, equipos fundamentales que dan el paso a la obtención del concentrado de cobre. Al revisar los antecedentes de este proceso, se encontró con un desorden en cuanto a la planificación del mantenimiento para los ciclones y también con poca información en cuanto a las fallas de estos equipos, por lo que se comienza recopilando los informes semanales de inspecciones a las baterías (hechas por el área de Operaciones), para así consolidarlos y buscar alguna tendencia común en cuanto a fallas.

Adicionalmente al estudio, se decide revisar la data histórica operacional de los hidrociclones con el fin de buscar tendencias que puedan relacionarse al mantenimiento. En base a esa data, se generan series de datos promedio y cruda a partir del registro de los dispositivos *PST* (*particle size tracking*) entre los años 2017 y 2018, para así analizar la relación entre granulometría de paso y el desgaste en el tiempo del revestimiento interno del ciclón, como también analizar si el plan de mantenimiento en sistema es el adecuado a la realidad en cuanto a los tiempos de recambio de estos.

En última instancia, se proponen dos alternativas innovadoras para contar con más variables que analizar. Una de ellas es la propuesta de un horómetro que, aparte de contar las horas de operación del ciclón, contabiliza el tonelaje procesado. La segunda, es la propuesta de un inserto de alambres de cobre en el revestimiento del ciclón para poder predecir el desgaste prematuro del revestimiento y formación de resaltes negativos, los que generan los *by-pass* de gruesos y por ende una mala clasificación. Estas propuestas permitirán realizar mejores análisis y seguimientos al área de Planificación, la que prontamente se irá de la planta y será remota, por lo que se requerirá más información en línea. Por último, nos permitirá hacer un mejor estudio del desgaste de revestimiento y controlar el comportamiento de un ciclón en el tiempo.

ABSTRACT

Day by day, the copper industry must optimize its processes in the areas of Operations and Maintenance in order to achieve improvements and automation to reduce production costs, make a safer operation for people, improve the recovery of copper and leverage in some way the decline of the copper law, which is the current trend and future.

The focus of the study in this work is the hydrocyclone batteries of the Laguna Seca Concentrator Plant at Minera Escondida, key equipment that leads to the obtaining of concentrate copper. When reviewing the background of this process, a disorder was found in terms of maintenance planning for the cyclones, also poor information regarding the failures of these equipment. This work begins by collecting the weekly reports of inspections to batteries (made by the area of Operations), by doing so, they consolidate and give information to look for some common trend in terms of failures.

In addition to the study, it is decided to review the operational historical data of hydrocyclones in order to look for trends that may be related to maintenance. Based on this data, average and raw data series were generated from the record of the PST (particle size tracking) devices between the years 2017 and 2018, in order to analyze the relationship between granulometry and wear through time of the cyclone internal lining, as well as analyzing whether the maintenance plan in the system is appropriate to reality in terms of the replacement times for them.

Lastly, two innovative alternatives are proposed to have more variables to analyze. One of them is the proposal of an hour meter that, apart from counting the operation hours of the cyclone, counts the tonnage processed. The second is the proposal of a copper wire insert in the cyclone lining to be able to predict the premature wear of the lining and formation of negative protrusions, which generate the by-pass of coarse material and therefore a bad classification. These proposals will allow for better analysis and monitoring to the area of Planning, which will soon leave the plant and be remote, so more information will be required online. Finally, it will allow us to make a better study of coating wear and control the behavior of a cyclone over time.

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. General	2
1.2.2. Específicos	2
2. Revisión de Antecedentes	3
2.1. Clasificación de Minerales	3
2.1.1. Granulometría	4
2.2. El Hidrociclón	4
2.2.1. Partes del Hidrociclón	4
2.2.2. Funcionamiento	5
2.2.3. Características	7
2.3. Hidrociclones en Concentradora Laguna Seca	8
2.3.1. Descripción General	8
2.3.2. Configuración de Equipos en Molienda CLS	9
2.3.3. Configuración de Batería de Hidrociclones CLS	11
2.3.4. Filosofía de Operación de las Baterías de Ciclones	12
2.4. Estado del Arte	14
2.4.1. Mantenimiento de Ciclones en Laguna Seca	14
2.4.1.1. Plan de Mantenimiento en Sistema <i>ISAP</i>	14
2.4.1.2. Inspección a Baterías	15
2.4.1.3. Fallas Comunes y Mantenimiento de Componentes	16
2.4.1.4. Recursos para el Mantenimiento de Ciclones	19
2.4.1.5. Horómetros	20
2.4.2. Equipos y Componentes de Estudio	20
2.4.2.1. Batería de Hidrociclones #1 (CS001)	20
2.4.2.2. Hidrociclón 10 Batería #2 (CY010 CS002)	20
2.4.2.3. PST: Particle Size Tracking System	20
2.4.2.4. Resaltes en Revestimiento	23
3. Metodología	26
3.1. Tags de Equipos	26
3.2. Generación Base de Datos	27
3.3. Generación de Serie Promedio para Ciclón 10 Batería 2	30
3.4. Generación de Serie Cruda para Ciclón 10 Batería 2	32
3.5. Confección de Horómetro	33
3.5.1. Propuesta Horómetro #1	33
3.5.2. Propuesta Horómetro #2	34
3.6. Medición de Desgaste en Revestimientos de Ciclones Retirados	34
3.7. Propuesta Tecnológica	37
3.7.1. Idea Original	37

3.7.2. Propuesta	38
3.7.3. Ensayos de Impacto	40
4. Análisis de Resultados	47
4.1. Análisis de la Serie Promedio Ciclón 10 Batería 2	47
4.2. Análisis de la Serie Cruda Ciclón 10 Batería 2	48
4.3. Análisis del Desgaste en Revestimientos	55
4.4. Análisis de la Confección de Horómetro	57
4.5. Análisis de la Propuesta Tecnológica	58
5. Conclusiones	61
Bibliografía	64
A. Tablas	66

Índice de Tablas

2.1. Listado del <i>piping</i> de una batería.	12
3.1. Tags para ciclones y sensores de Batería 1 y Batería 2.	27
3.2. Fechas máximas de los registros de sensores obtenidas a través de <i>Uniformance</i>	28
3.3. Significado de los datos que entrega el sensor de apertura y cierre.	31
3.4. Tabla con los objetos y masas utilizadas en los ensayos.	46
4.1. Tabla que, para una misma fecha y hora, compara la granulometría registrada por el ciclón 10 batería 2 con otros cuatro ciclones de la misma batería.	54
4.2. Tabla con tasas de desgaste para el ciclón 10 de batería 2, considerando el enfoque de tiempo de instalación y enfoque de tiempo de operación.	55
4.3. Tabla con tasas de desgaste considerando el tiempo de instalación de ciclones de Batería 1.	56
A.1. Consolidado de fallas comunes detectadas en inspecciones a baterías de ciclones entre el 11-03-18 al 26-08-18.	67
A.2. Tabla representativa de la serie de datos promedio generada para Ciclón 10 Batería 2.	68
A.3. Tabla representativa de la serie de datos generada para válvula de alimentación a Ciclón 10 Batería 2.	68
A.4. Tabla representativa de la serie de datos cruda para el Ciclón 10 Batería 2.	68
A.5. Tabla con el registro de los nueve puntos de medición de espesores hechos a revestimientos de ciclones.	68
A.6. Tabla con la cantidad de aperturas y cierres por año y mes de la válvula de alimentación del Ciclón 10, Batería 2.	69
A.7. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,10 milímetros, sin capa de caucho.	69
A.8. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,20 milímetros, sin capa de caucho.	70
A.9. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,52 milímetros, sin capa de caucho.	70
A.10. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,10 milímetros, con capa de caucho de 2 milímetros.	70
A.11. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,20 milímetros, con capa de caucho de 2 milímetros.	71
A.12. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,52 milímetros, con capa de caucho de 2 milímetros.	71
A.13. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,10 milímetros, con capa de caucho de 10 milímetros.	72
A.14. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,20 milímetros, con capa de caucho de 10 milímetros.	72
A.15. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,52 milímetros, con capa de caucho de 10 milímetros.	73

A.16. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,10 milímetros, sin capa de caucho.	73
A.17. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,20 milímetros, sin capa de caucho.	73
A.18. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,52 milímetros, sin capa de caucho.	73
A.19. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,10 milímetros, con capa de caucho de 2 milímetros.	74
A.20. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,20 milímetros, con capa de caucho de 2 milímetros.	74
A.21. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,52 milímetros, con capa de caucho de 2 milímetros.	74
A.22. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,10 milímetros, con capa de caucho de 10 milímetros.	74
A.23. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,20 milímetros, con capa de caucho de 10 milímetros.	75
A.24. Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,52 milímetros, con capa de caucho de 10 milímetros.	75
A.25. Tabla con fechas de instalación y falla de ciclones de la Batería 1 al 04-11-2018.	76

Índice de Figuras

1.1. Industria minera del cobre como porcentaje del PIB.	1
2.1. Diagrama de Conminución.	4
2.2. Partes generales de un hidrociclón.	5
2.3. Flujos al interior de un hidrociclón.	6
2.4. Perfiles de velocidad.	6
2.5. Diagrama de procesos del área de molienda.	8
2.6. Diagrama de procesos del área de flotación.	9
2.7. Diagrama de flujo del área de molienda.	10
2.8. Diagrama de flujo del circuito de <i>pebbles</i>	11
2.9. Conjunto ensamble de una batería de ciclones y despiece del <i>piping</i>	11
2.10. Imagen lateral de una batería de hidrociclones (configuración en 45°).	12
2.11. Plan declarado en sistema <i>ISAP</i> para el cambio de ciclones.	14
2.12. Fotografía aérea del sector de tránsito de ciclones en patios de salvataje.	15
2.13. Hallazgos y fallas comunes registradas durante inspección en ciclones a partir de Tabla A.1.	16
2.14. Desprendimiento de revestimientos en conos intermedios.	17
2.15. Obstrucción de <i>apex</i> por placa metálica externa.	17
2.16. Obstrucción de <i>apex</i> por carpetas plásticas externas.	18
2.17. Ciclón en condición de embancamiento.	18
2.18. Personal de empresa colaboradora en maniobras de izaje para el cambio de un ciclón.	19
2.19. Rotura de revestimiento en cono superior, lo que provoca una nula clasificación.	21
2.20. Impacto de partículas sobre cabezal de sensor <i>PST</i>	21
2.21. Cyclonetrac™ <i>PST</i> . En el cuerpo metálico de color amarillo se encofra la electrónica del dispositivo, mientras que la probeta se encuentra recubierta por caucho de color gris.	22
2.22. Montaje de <i>PST</i> (de color amarillo) en ducto de descarga <i>overflow</i>	23
2.23. Vista interior de un ciclón nuevo desde el <i>apex</i> . Flechas verdes indican los resaltes positivos.	24
2.24. Vista interior de un ciclón retirado desde el <i>apex</i> . Flechas rojas indican los resaltes negativos.	24
2.25. Dirección del flujo sobre el revestimiento con las dos condiciones de resaltes.	25
3.1. Esquema general para la generación de tablas de datos.	28
3.2. Esquema final con entradas y salidas.	29
3.3. Gráfico de la Serie Promedio sin procesar del Ciclón 10 Batería 2.	30
3.4. Diagrama lógico de la propuesta de horómetro #1.	33
3.5. Diagrama lógico de la propuesta de horómetro #2.	34
3.6. Plantilla utilizada para marcar puntos de medición en revestimientos retirados.	35
3.7. Personal de empresa colaboradora retirando revestimiento de caucho que tenía embancado al ciclón.	36
3.8. Franjas seccionadas de caucho proveniente de cono intermedio.	36
3.9. Ilustración de la idea original para enmallar caucho.	37
3.10. Vista seccionada de dos conos, donde se muestra la zona propuesta para el inserto de alambres.	38
3.11. Vista en corte del cono inferior e intermedio.	39
3.12. Vista en detalle del inserto.	39

3.13. Imagen del *tester* digital marca *Microlab* modelo *MCL 4547*. 40

3.14. Imagen general del montaje de la plataforma de pruebas. 42

3.15. Imagen del montaje del *tester* conectado a alambres. 43

3.16. Imagen de la configuración de los alambres. 43

3.17. Imagen del montaje del caucho sobre la plataforma de pruebas. 44

3.18. Imagen de las rocas y bolas utilizadas para los ensayos. 44

3.19. Imagen del cuarzo de 4 kilogramos. 45

3.20. Discos de mancuernas utilizados para los ensayos de la Categoría 2. 45

4.1. Gráfico de la Serie Promedio procesada del Ciclón 10 Batería 2. 48

4.2. Gráfico de la Serie Cruda procesada del Ciclón 10 Batería 2, para el periodo de julio y noviembre 2017. 49

4.3. Gráfico de la Serie Cruda procesada del Ciclón 10 Batería 2, para el periodo de diciembre 2017 y febrero 2018. 50

4.4. Gráfico de la Serie Cruda procesada del Ciclón 10 Batería 2, para el periodo de marzo y abril 2018. 51

4.5. Gráfico de la Serie Cruda procesada del Ciclón 10 Batería 2, para el periodo de mayo y julio 2018. 52

4.6. Gráfico de la Serie Promedio superpuesta en la Serie Cruda (ambas procesadas) del Ciclón 10 Batería 2. 53

4.7. Gráfico comparativo de la duración del revestimiento según el enfoque de tiempo. 55

4.8. Gráfico con los registros de espesores finales medidos en revestimiento en función del tiempo de instalación. 56

4.9. Categoría 1 de ensayos de impacto con masas sobre tres diámetros de alambre, sin caucho. 58

4.10. Categoría 1 de ensayos de impacto con masas sobre tres diámetros de alambre, con caucho de 2 [mm]. 58

4.11. Categoría 1 de ensayos de impacto con masas sobre tres diámetros de alambre, con caucho de 10 [mm]. 59

4.12. Categoría 2 de ensayos de impacto con masas sobre tres diámetros de alambre, sin caucho. 60

4.13. Categoría 2 de ensayos de impacto con masas sobre tres diámetros de alambre, con caucho de 2 [mm]. 60

4.14. Categoría 2 de ensayos de impacto con masas sobre tres diámetros de alambre, con caucho de 10 [mm]. 60

Siglas

AVG Average (promedio). 27

CLS Concentradora Laguna Seca. 9, 11

DCS Distributed Control System (Sistema de Control Distribuido). 37, 47

L1 Línea 1. 11

tpd Tonne Per Day (tonelada por día). 8, 9

tph Tonne Per Hour (tonelada por hora). 9

Glosario

ISAP Sistema integrado de planeamiento de recursos para la administración de datos e información. A través de este se gestionan los planes y planificaciones del mantenimiento, como también se da aviso sobre fallas, condiciones inseguras en planta o solicitudes de trabajo. 14

Distributed Control System (DCS) Plataforma para controlar de manera automatizada el funcionamiento de un proceso industrial o una planta. 34

feeder Chute (tolva) que alimenta una correa transportadora. Para los chutes bajo *stockpile*, la alimentación es controlada y graduada dependiendo del porcentaje de fino o grueso que requiera el molino SAG. 9, 10

flotación Circuito donde el producto de la molienda es sometido a procesos fisicoquímicos con el fin de obtener el concentrado de cobre. 3, 8, 10, 13, 20

histéresis Derivación de una palabra del griego antiguo que significa “deficiencia” o “estar rezagado”. La palabra histéresis fue utilizada para describir el comportamiento de materiales magnéticos en 1890. Hoy en día se habla de histéresis cuando se hace referencia a un material que puede conservar una propiedad o comportamiento, ante la falta de la perturbación o estímulo que la generó. 37, 38

línea Circuito completo de procesamiento de mineral diferenciadas por molino SAG que abarca desde stockpile hasta espesadores de relaves. En este trabajo se hace referencia a Línea 1 (molino SAG 4) y Línea 2 (molino SAG 5, ex Proyecto OGP1), ambas pertenecientes a la planta Concentradora Laguna Seca. 8, 9, 20

mineroducto Sistema de tuberías que transporta el concentrado de cobre desde planta ubicada en faena hacia, generalmente, un puerto marítimo, logrando cubrir extensas distancias. 8

molienda Proceso continuo de conminución del mineral proveniente de la mina, compuesto por molinos SAG y molinos de bola. 3, 8–11

molino SAG Molino horizontal semiautógeno que utiliza el mismo mineral de entrada mezclado con alrededor de un 20 % de bolas de 5 pulgadas de diámetro, para reducir su propio tamaño. El mineral y bolas son elevados por los *lifters* (placas surcadas en toda la pared del molino), los cuales a cierta altura liberan esta mezcla, dejándola caer sobre la misma que está a una altura inferior. 3, 9, 10, 12

molino de bolas Equipo rotatorio encargado de moler horizontalmente el mineral proveniente del molino SAG, mediante la mezcla de bolas de acero de 3 pulgadas de diámetro, agua y reactivos, contenidos en su cuerpo cilíndrico. La reducción es por medio de atrición del mineral entre los intersticios de las bolas a medida que el molino gira. 3, 9, 10, 12, 20

overflow Sección superior de un hidrociclón por donde sale la pulpa con contenido de finos apta para ser enviada al circuito de flotación. También hace referencia en sí a la misma pulpa de granulometría fina. 4, 7, 12, 19, 20, 22

- overland** Correa transportadora diseñada para trasladar una alta capacidad de mineral generalmente a lo largo de extensas distancias. 8
- pebble** Mineral proveniente del molino *SAG* que ha sido descartado por sobretamaño en el harnero. Este tamaño de roca no es apto para ser procesado por los molinos de bola, por lo que es enviado al circuito de chancado de la planta y luego reinyectado al molino *SAG*.. 10
- RAW** Palabra del idioma inglés que significa crudo, puro o bruto. Para este estudio, la definición de *RAW* radica en la obtención del dato instantáneo registrado por un sensor, sin ser modificado o filtrado, según su tasa de refresco o su tasa de medición intrínseca. 27, 32
- recuperación** Porcentaje de metal de interés recuperado del mineral mediante procesos metalúrgicos. 8
- Run of Mine (ROM)** Mineral sin procesar que ha sido extraído de mina mediante tronaduras. Los metales u otras materias valiosas presentes en este, deben ser extraídos mediante procesos de flotación o lixiviación, luego de traspasar diferentes etapas de conminución. 3
- shutdown** Mantenición a gran escala que implica la detención de la planta por alrededor 6 días, para así asegurar una disponibilidad por 6 meses más en cuanto a mantenimiento. 16
- snapshot** Palabra del idioma inglés que, para el estudio, se interpreta como “captura instantánea” de una medición de algún sensor para intervalos de tiempo definido por el usuario. 27
- stockpile** Acopio de mineral grueso proveniente del área de chancado, para ser procesado por el área de molienda. 8–10
- tag** Código de identificación única de un equipo o instrumento perteneciente a un área específica de la planta. 26, 27, 33
- tratamiento** Tonelaje diario (o por hora) de mineral *ROM* procesado por el molino *SAG*. 7, 8
- trommel** Componente unido a la descarga del molino *SAG* que gira solidariamente a este. El mineral procesado por el molino es clasificado por las mallas de este componente, donde será repartido posteriormente a los sumideros de los molinos de bola o al harnero. 3, 9, 10
- underflow** Sección inferior de un hidrociclón por donde sale la pulpa con contenido de gruesos no apta para ser procesada por el circuito de flotación. Esta irá directamente a los molinos de bola nuevamente para continuar con la conminución. También hace referencia en sí a la misma pulpa de granulometría gruesa. 4, 5, 7, 12, 15

1 | Introducción

1.1. Motivación

Los recursos naturales han jugado siempre un papel importante en la economía chilena. “Durante la Conquista y la Colonia, este papel lo desempeñaron el oro y la plata (···); en 1890 las exportaciones salitreras constituían la mitad de las exportaciones chilenas (···) y hacia finales del siglo XIX y comienzos del XX, se produjo un brusco aumento de la demanda mundial (del cobre) (···). Éste, desde 1945, ha representado más del 50 % de las exportaciones totales” (Meller, 1996). “Tres décadas después Chile ha situado a la Minería (del cobre) como un pilar central del desarrollo económico sustentable, representando 10 % del PIB del país, aportando un 7.8 % promedio de los ingresos fiscales, y cerca de 400 000 empleos” (ICA, 2017).

Industria minera del cobre como porcentaje del PIB (basado en datos de referencia de 2013)

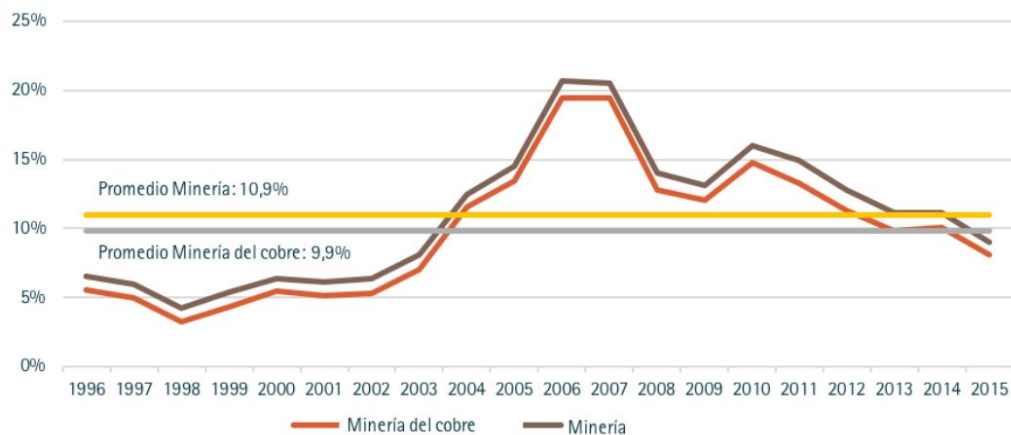


Figura 1.1: Industria minera del cobre como porcentaje del PIB.

(Fuente: Banco Central de Chile)

Chile hoy continúa siendo el mayor productor mundial de cobre y ocupa el sexto lugar en el mundo en términos de producción minera después de Australia, China, Rusia, Sudáfrica y Estados Unidos. Sin embargo, los costos han aumentado y el desafío es ahora manejar los recursos y procesos de manera más eficiente para lograr mantener las ganancias. Acorde a lo estudiado por *Chicago Policy Review*, “(···) es necesario aumentar la productividad, pues esta promueve el desarrollo económico a largo plazo. Sin embargo (en America Latina), las mediciones que existen de la productividad en la industria de los recursos naturales son escasas, y muchas de las que se encuentran disponibles son limitadas o poco rigurosas” (González Carrasco, 2018).

En este contexto, la mejor fuente de información es hoy, la experiencia de los trabajadores de la minería. En particular en Minera Escondida, empresa que “produce más cobre que cualquier otra mina del mundo” (BNamericas, 2015), son diversos los focos de improductividad detectados por operadores y mantenedores en la operación de la planta, quienes destacan que es evidente que “las mayores pérdidas son producto de la detención de equipos, ya sea de manera planificada o de urgencia”. Disminuir los tiempos de mantención es uno de los objetivos clave del proceso, y esto puede lograrse únicamente con una planificación y conocimiento cabal del funcionamiento de los equipos, antecedentes que hoy no se manejan tan detalladamente como se desearía.

Este trabajo intenta relacionar variables operacionales con el mantenimiento, de manera que se pueda entrelazar la información para mejorar los planes preventivos y predictivos, y así facilitar la planificación de recursos materiales y personas. Se espera que a mediano plazo, una gran parte de las variables de procesos se puedan relacionar al mantenimiento para poder tener más antecedentes de fallas o mejores predicciones, como así también incorporar mayor tecnología a los equipos para dar paso a la automatización, depender menos de la intervención humana, mejorar índices de seguridad, crear métodos replicables a otras industrias y disminuir así los costos de producción.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Ante la oportunidad de intervenir el área de las baterías de hidrociclones, se busca analizar la data operacional y antecedentes históricos de estas para generar una alternativa de mejora al plan de mantenimiento existente, además de entregar una propuesta de innovación tecnológica que sea reproducible a otras faenas mineras y procesos industriales de clasificación.

1.2.2. Específicos

- Proponer una o varias mejoras al plan actual de mantenimiento por medio de utilización de la data operacional disponible en una batería de ciclones.
- Analizar la data operacional histórica de las baterías de Concentradora Laguna Seca para determinar el comportamiento del desgaste en el revestimiento de los hidrociclones.
- Plantear una o más soluciones tecnológicas que permitan interpretar señales relacionadas al desgaste del revestimiento interno de los ciclones.

2 | Revisión de Antecedentes

2.1. Clasificación de Mineral

La clasificación nace de la necesidad de diferenciar, separar y ordenar elementos tangibles e intangibles asignándoles características como tamaño, color, forma o conceptos entre muchos otros. La ciencia de la clasificación es la taxonomía, donde existen diversas ramas dependiendo de los objetos o ideas en estudio. Esta ciencia es fundamental y es aplicada por las diversas disciplinas involucradas en la explotación de recursos naturales de la tierra, como por ejemplo, la geología de los yacimientos y del mineral extraído con el fin de procesarlo adecuadamente, dependiendo de las características físicas y químicas analizadas.

Es importante tener métodos de clasificación diferenciados a lo largo del proceso minero ya que simplifica la manipulación y la logística del material extraído de la mina, y por sobre todo, asegura un correcto funcionamiento de los equipos en base al diseño de planta o al proceso con el que fueron conceptualizados, logrando obtener los resultados deseados. Ejemplo importante de esto se aprecia en el área de flotación de una concentradora, donde el material que proviene directamente de las baterías de ciclones debe ser adecuadamente clasificado y segregado según cierto tamaño de partícula. Si falla esta clasificación, el proceso de flotación no será capaz de recuperar el porcentaje de cobre óptimo para el cual fue diseñado.

Dentro del proceso de explotación de mineral, se encuentra la fase de conminución, concepto asociado a la reducción del tamaño de un mineral, sometiéndolo a fuerzas mecánicas e interacciones de disoluciones químicas, entre otras. Generalmente la conminución, en la industria de extracción del cobre, toma lugar desde la tronadura en mina hasta los procesos finales de la molienda para que el tamaño de mineral sea apto para tratar por flotación o solo hasta los procesos finales de chancado para que el mineral sea procesado por lixiviación. Esto implica que el mineral *Run of Mine (ROM)* deberá atravesar distintas fases como: cizalle, desgaste, aplastamiento, chancado y disoluciones químicas (Drzymala, 2007).

Una planta concentradora de cobre incorpora la conminución en su fase primaria, área conocida como molienda, donde el tamaño del mineral es reducido principalmente por molinos *SAG* y molinos de bolas o barras. Dentro de esta área existen equipos fundamentales para la operación, como lo son el *trommel*, el harnero vibratorio y las baterías de hidrociclones. La función de ellos es clasificar el mineral dependiendo del tamaño, peso y forma, a través de distintos métodos mecánicos como vibraciones, circulación por estructuras ranuradas, mallas o separación centrífuga. Sin estos equipos de clasificación, no se lograría la obtención del concentrado de cobre.

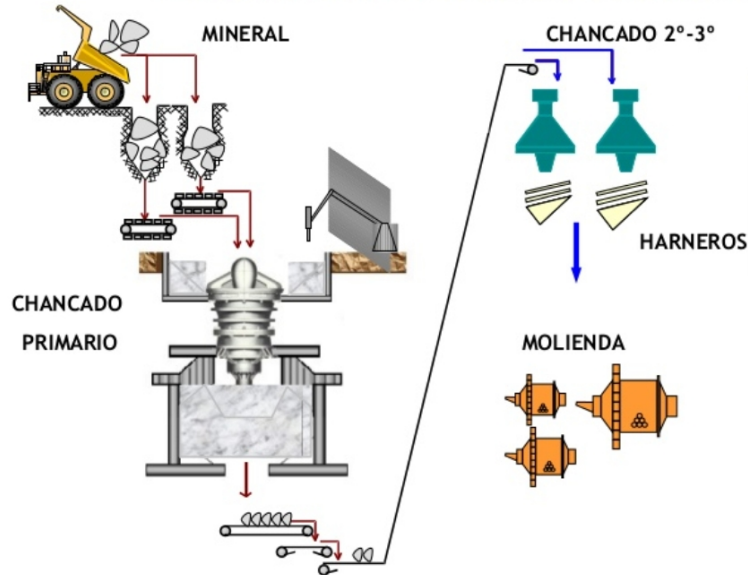


Figura 2.1: Diagrama de Conminución.

(Fuente: Cochilco (2006))

2.1.1. Granulometría

Granulometría es la medición de distribución del tamaño de partícula presente en una muestra de granos o áridos (of Chemistry, 2009). Generalmente se logra por medio del análisis de tamices con diferentes tamaños de abertura en la malla según la norma que se utilice. Esto permite identificar y cuantificar porcentajes de pesos según escalas granulométricas de las partículas que constituyen una masa total de la muestra analizada. Para este trabajo, también se definirá “granulometría” como tamaño de partícula.

2.2. El Hidrociclón

El origen del hidrociclón data del 1891, año en que fue patentado en los Estados Unidos como una invención para purificar agua (Bretney, 1891), sin embargo su aplicación en procesos industriales no ocurrió hasta fines de los años 40. Hoy es uno de los equipos por excelencia en procesos industriales de clasificación debido a su simplicidad de diseño, confiabilidad, fabricación, operación y mantenimiento simple (Patra et al., 2017).

2.2.1. Partes del Hidrociclón

Un ciclón se compone por una sección cilíndrica en la parte superior y una sección cónica en la parte inferior. En la sección cilíndrica se encuentra el ducto tangencial de alimentación y además el *vortex finder*, ducto por el cual se descarga el *overflow* (material con bajo tamaño de partícula). A su vez, por la parte inferior cónica, ocurre la descarga del material grueso (*underflow*) a través del *apex*. Una de las ventajas de estos equipos es que no tienen partes móviles, lo que simplifica su fabricación, ensamble y mantenimiento.

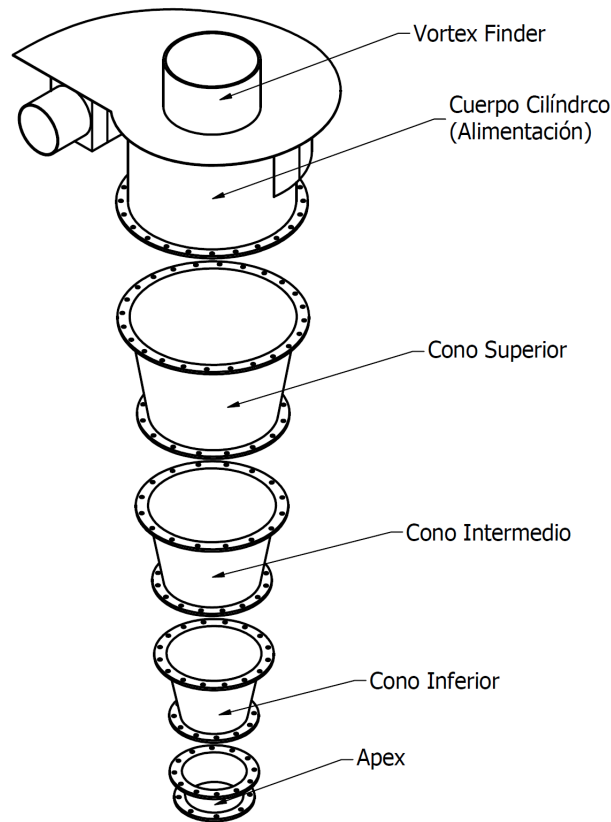


Figura 2.2: Partes generales de un hidrociclón.

2.2.2. Funcionamiento

El hidrociclón es un equipo diseñado con el fin de separar materiales sólidos contenidos en líquidos según su densidad, tamaño o peso debido a la acción centrífuga que se genera en su interior. En este se transforma la energía estática del fluido (presión) en energía dinámica (velocidad).

Al interior del hidrociclón se identifican dos zonas de movimiento para el fluido (ver Figura 2.3): el vórtice libre en la periferia (corriente descendente) y el vórtice de fuerza en el centro (corriente ascendente). Este fenómeno se genera al alimentar tangencialmente al ciclón, donde el fluido y partículas adquieren rapidez a medida que recorren la estructura de este. Al existir una diferencia de presión negativa producto del vórtice al interior del ciclón, el aire ingresa por la abertura en el *underflow* y recorre la columna central del equipo como la corriente ascendente descrita anteriormente.

Al descomponer la velocidad del fluido, se tiene que la componente más importante en la clasificación del material es la velocidad tangencial (no así en el centro donde la velocidad axial es mayor), ya que esta imprimirá un campo de aceleración sobre las partículas, lo que genera finalmente la fuerza de separación (Figura 2.4).

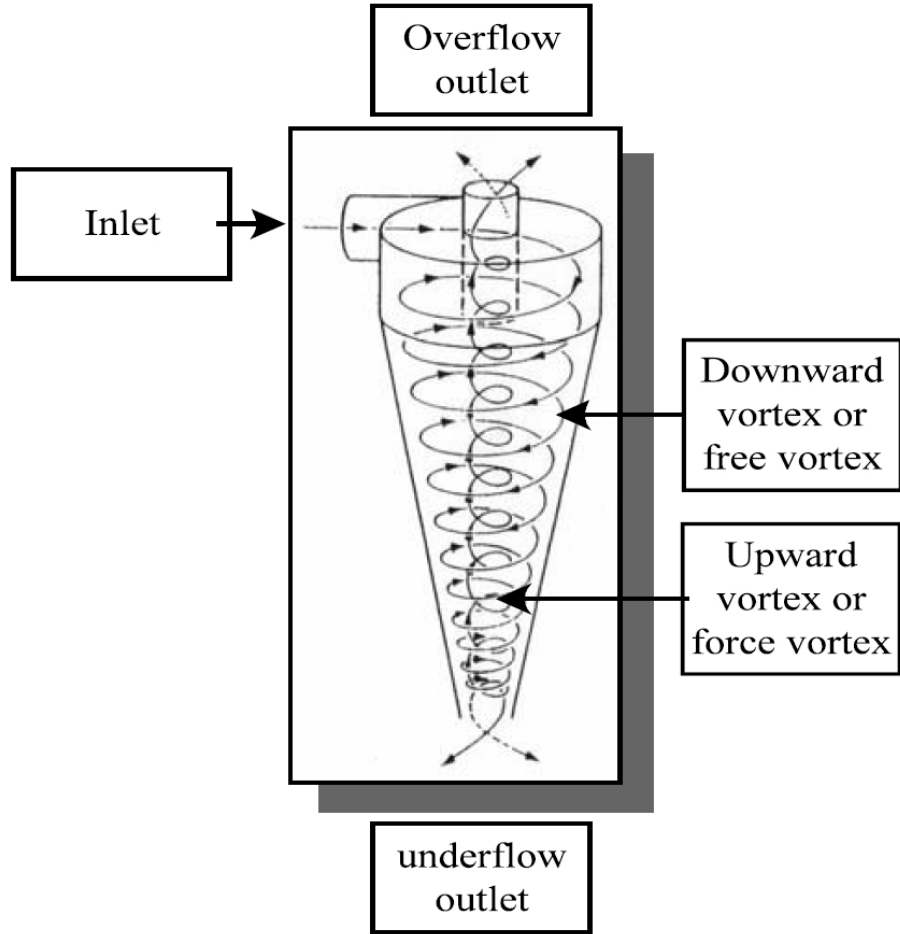


Figura 2.3: Flujos al interior de un hidrociclón.

(Fuente: Puprasert et al. (2004))

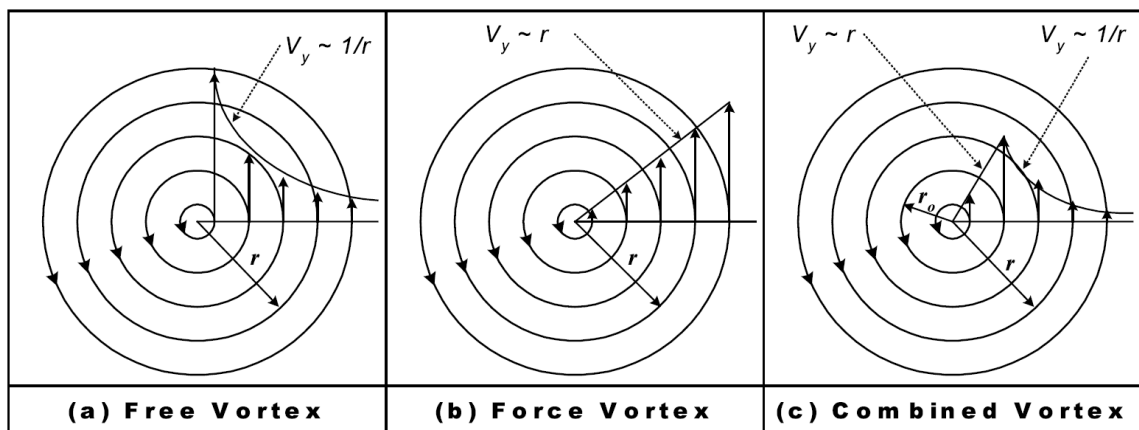


Figura 2.4: Perfil de velocidad del vórtice libre (a), del de fuerza (b) y la combinación de ellos (c).

(Fuente: Puprasert et al. (2004))

Las partículas en el líquido que tienen mayor velocidad de sedimentación (más densas) son centrifugadas al borde del ciclón y las partículas con baja velocidad de sedimentación (menos densas) se aglomeran en la columna central del vórtice. Luego el material acumulado en la periferia desciende debido a la gravedad y se aproxima al *apex*, el cual tiene un diámetro menor que su contraparte vertical, llamada *vortex finder*. Esto provoca una saturación del material con sobretamaño en la descarga (Güenechea, 2016) y obliga a que el líquido y aire se dirijan a través del vórtice de fuerza hacia la parte superior del ciclón, arrastrando con ello las partículas cercanas al centro hasta el *vortex*, logrando así la clasificación de material fino llamado *overflow*.

2.2.3. Características

Según Bradley (1965), la eficiencia de clasificación o nivel de tratamiento que se espera del material entrante se rige por el *cut-size* (d_{50}), definido como el tamaño de la partícula que puede ser separada de una fase continua por un hidrociclón al 50 % de su eficiencia, o en otras palabras, es la probabilidad del 50 % de que una partícula sea arrastrada hacia el *overflow* o el *underflow*.

$$d_{50} = K \sqrt{\frac{D_{HC}^3 \mu_c}{Q \Delta \rho}} \quad (2.1)$$

En esta ecuación, se aprecian los siguientes términos para d_{50} :

- K : Constante de la ecuación.
- D_{HC} : Diámetro de la sección cilíndrica.
- μ_c : Viscosidad de la fase líquida.
- Q : Flujo alimentación.
- $\Delta \rho$: Diferencial de densidad entre partícula sólida y fase líquida.

Acorde a la Ecuación 3.1, la variable más influyente en la eficiencia de clasificación es el diámetro del cuerpo (D_{HC}), por lo que a menor valor de este, se tiene un menor tamaño de corte y así una mayor eficiencia. Esta dimensión es además utilizada para diferenciar los ciclones en el mercado, por ejemplo, el ciclón a analizar en este estudio es un *Krebs* modelo *Gmax33*, donde el número 33 son las pulgadas del diámetro nominal.

Otra variable a considerar en cuanto a la configuración de la batería, es el ángulo de instalación del ciclón, donde se ha demostrado que otorgarle inclinación al equipo mejora considerablemente la clasificación cuando estos son grandes y trabajan a baja presión (Asomah y Napier-Munn, 1997). Con esto existe un menor *by-pass* de finos, un menor desgaste en el revestimiento y se puede aumentar el tamaño de corte. En la Figura 2.10 se puede apreciar una inclinación de alrededor 45°.

Existen más consideraciones para poder concebir el diseño de un ciclón dependiendo de la mezcla a separar, como la caída de presión, la gravedad específica de los distintos minerales a clasificar, los efectos físicoquímicos y los materiales de los revestimientos entre otros, pero se considera al *cut-size* como el principal.

2.3. Hidrociclones en Concentradora Laguna Seca

2.3.1. Descripción General

Cada compañía minera tiene diversas configuraciones de equipos según las características del mineral que procesan y también de la capacidad de extracción diaria que cuentan en la mina.

Escondida es la mina de mayor producción en el mundo, con alrededor de 1 200 000 toneladas anuales de cobre fino (BHP, 2018), representando alrededor del 7 % del aporte mundial (ICSG, 2018). En esta mina se extraen alrededor de 1 400 000 toneladas diarias de material desde los rajos Escondida Norte y Escondida Sur (Rode, 2015), donde la mayoría del material útil es posteriormente chancado y transportado mediante correas overland a los stockpiles de Concentradora Los Colorados y Concentradora Laguna Seca, siendo esta última el lugar de estudio de esta memoria.

El objetivo de una planta concentradora es obtener el producto final de concentrado de cobre mediante diversos procesos de aspectos mecánicos y químicos.

Laguna Seca está compuesta por Línea 1 y Línea 2 donde se encuentran sus respectivas áreas de molienda y flotación. Ambas líneas son simétricas en su diseño e instalación de equipos y cuentan con una capacidad en conjunto de tratamiento mineral de aproximadamente 300 000 [tpd], una recuperación alrededor del 85 % y producción promedio de cobre fino de 2 000 [tpd]. Todo este cobre fino es transportado como concentrado hacia el Puerto Coloso (ubicado en Antofagasta) por medio de un mineroducto. Este puerto cuenta con la infraestructura y equipos necesarios para filtrar, secar y almacenar el concentrado de cobre en sus pilas de acopio, para luego ser embarcado y distribuido al mercado mundial.

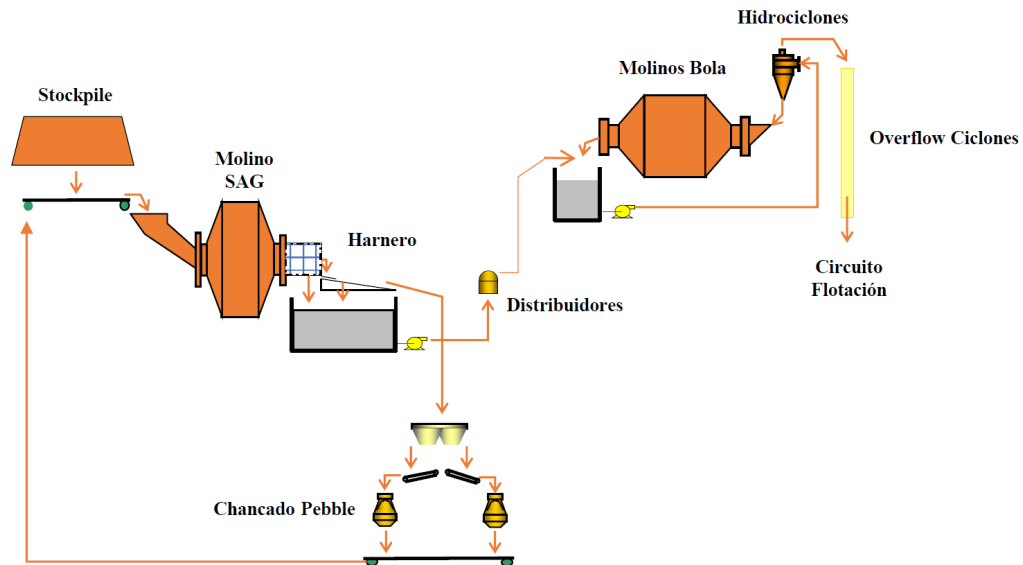


Figura 2.5: Diagrama de procesos del área de molienda.

(Fuente: Bechtel (2012))

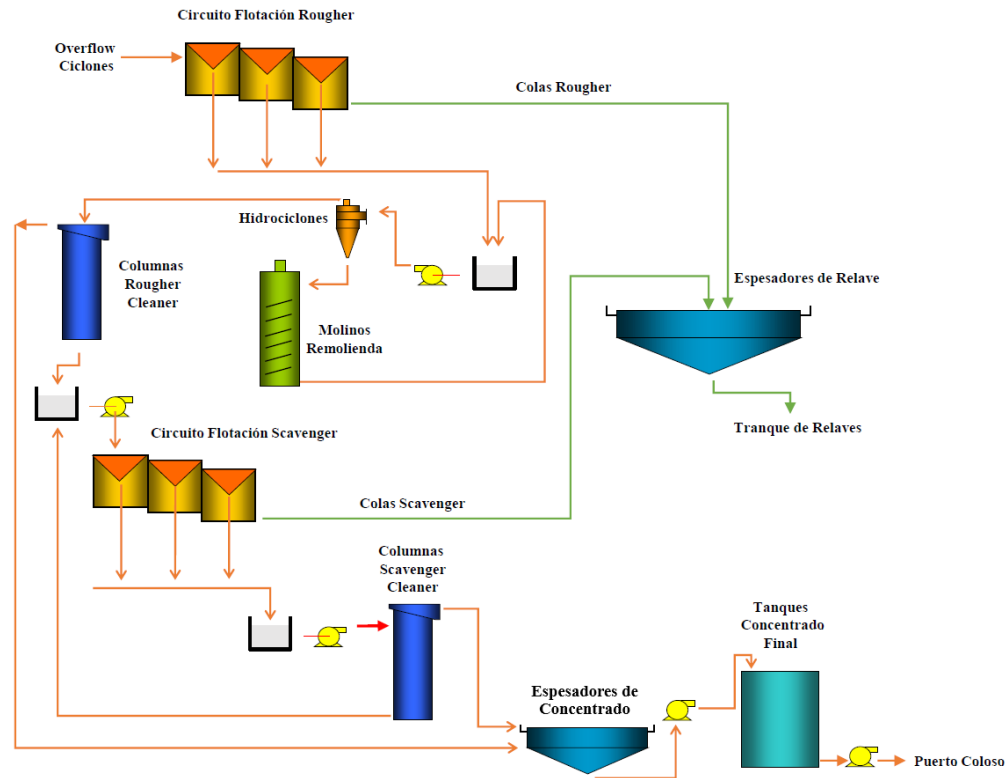


Figura 2.6: Diagrama de procesos del área de flotación en Concentradora Laguna Seca.

(Fuente: Bechtel (2012))

2.3.2. Configuración de Equipos en Molienda CLS

Dada la cantidad de material que procesa Laguna Seca a través de su Línea 1 (aproximadamente 6 000 [tph]), se tiene la siguiente configuración en el área de molienda:

■ Circuito de Molienda

- 1 Stockpile con capacidad de 150 000 [tpd].
- 8 Feeders bajo stockpile.
- 1 Molino SAG de Ø38 pies.
- 1 Trommel
- 1 Harnero
- 2 Bomba de pulpa bajo tamaño en SAG.
- 2 Distribuidores de carga (1 por cada bomba bajo SAG) hacia los Molinos de bola .
- 4 Molinos de bola
- 4 Bombas de pulpa bajo tamaño en molinos bola.
- 4 Baterías de Hidrociclones gMax33.

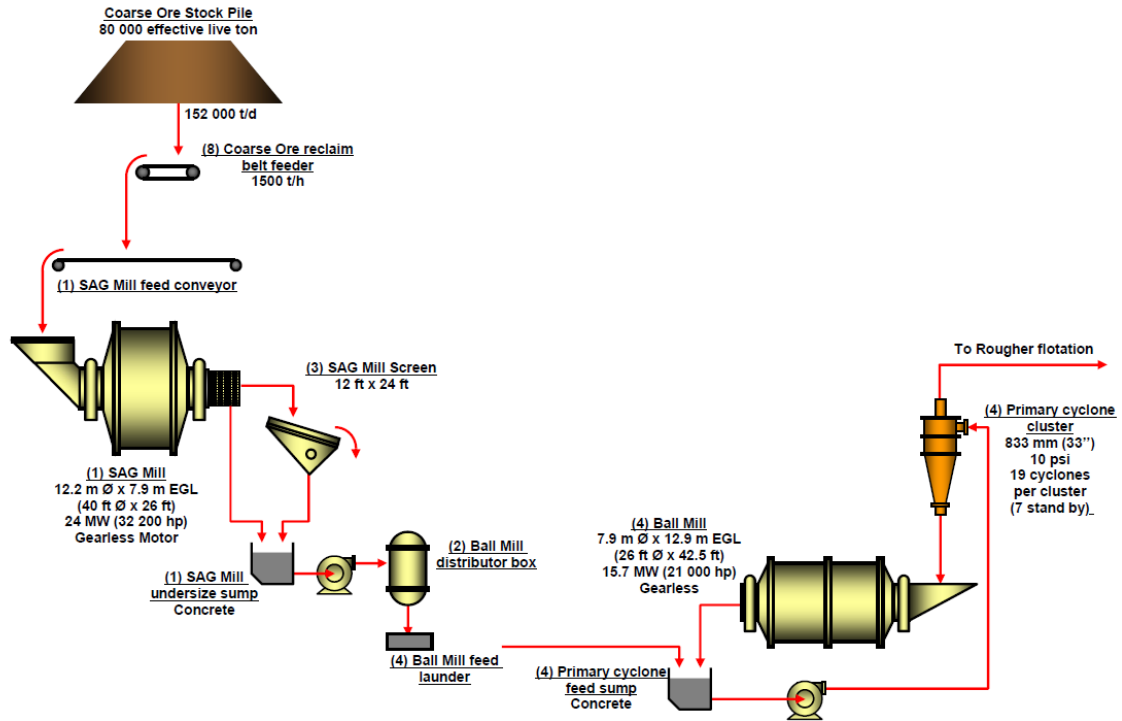


Figura 2.7: Diagrama de flujo del área de molienda en Concentradora Laguna Seca.

(Fuente: Bechtel (2012))

El circuito de molienda se inicia en los *feeders* donde se descarga el mineral desde el *stockpile* hacia una correa transportadora que alimenta al molino SAG. Este en su descarga tiene conectado un *trommel*, donde el mineral con sobretamaño pasa por un harnero vibratorio que vuelve a separar el material de mayor tamaño enviándolo a los chancadores del circuito de *pebble*. El mineral clasificado como fino, tanto en el *trommel* como en el harnero, va a dar al sumidero del molino SAG que se encuentra debajo de estos equipos.

Desde el sumidero bajo SAG, la pulpa es impulsada y conducida mediante bombas y canaletas hacia la molienda secundaria donde hay cuatro molinos de bola que operan en un circuito cerrado con sus respectivas baterías de ciclones (ver Subsección 2.3.3), proceso en el cual se obtiene la pulpa con granulometría adecuada para enviarla al circuito de flotación.

■ Circuito de Sobretamaño Harnero (Circuito de *Pebble*)

- 1 Silo de pebbles
- 2 Feeders de alimentación
- 2 Chancadores

El circuito de *pebble* se inicia en el harnero y todo este material de sobretamaño es triturado por dos chancadores, reduciendo así la granulometría. Finalmente todo este producto es reinyectado nuevamente a la correa que alimenta al molino SAG.

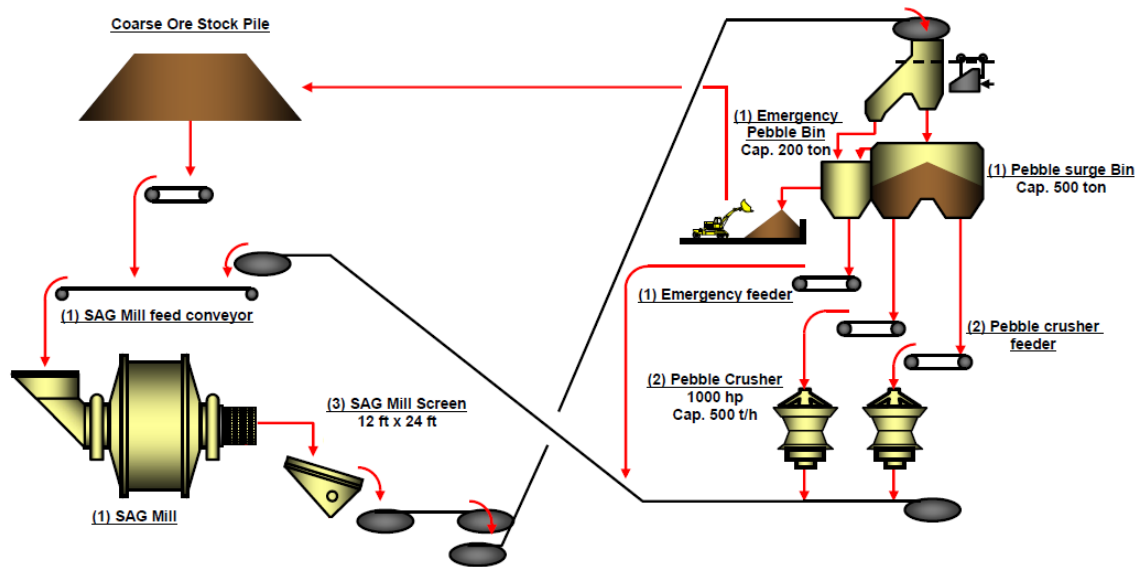


Figura 2.8: Diagrama de flujo del circuito de *pebbles*.

(Fuente: Bechtel (2012))

2.3.3. Configuración de Batería de Hidrociclones CLS

Las baterías de ciclones presentes en Molienda L1 son cuatro, las que son idénticas entre si en cuanto a cantidad de componentes, diseño y configuración de instalación. Cada una está conformada por tuberías y principalmente por 19 ciclones *Krebs Gmax33* de 33 pulgadas, 19 válvulas de corte y 19 sensores *Cidra Cyclonetrac PST*. Su operación contempla un mínimo de 12 ciclones trabajando a una presión de 10 [psi] y 7 ciclones en modo stand-by (Muñoz et al., 2017). Los últimos tres componentes mencionados son de particular interés para este trabajo de investigación, dado que de ellos se obtendrán datos para el análisis y propuesta de mejoras.

Por cada batería se encuentra el siguiente conjunto de partes:

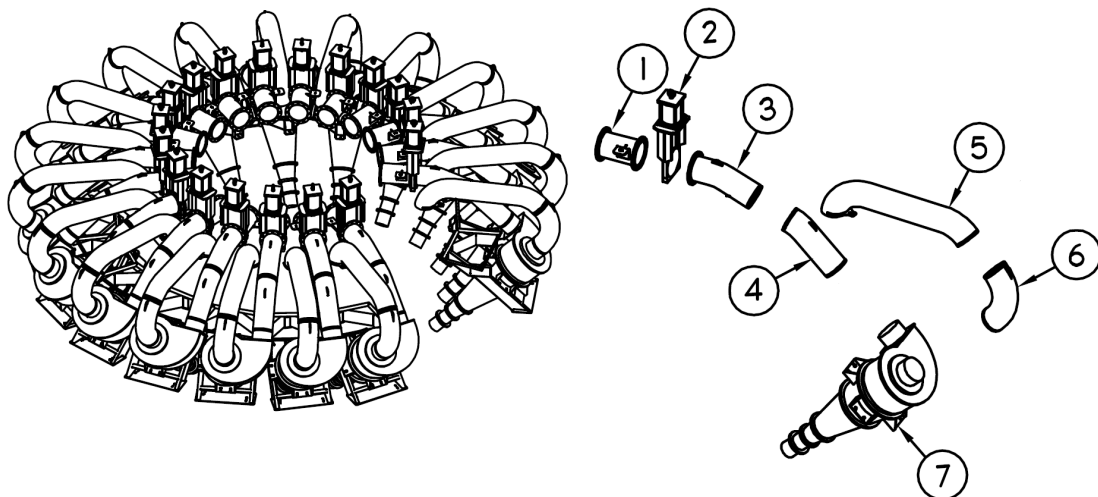


Figura 2.9: Conjunto ensamblado de una batería de ciclones y despiece del piping.

(Fuente: Krebs® Engineers 2000)

Tabla 2.1: Listado de *piping* de una batería.

Ítem	Descripción	Cantidad
1	Carrete de alimentación <i>A</i>	19
2	Válvula KGD neumática	19
3	Carrete de alimentación <i>B</i>	19
4	Carrete de alimentación <i>C</i>	19
5	Tubería descarga <i>Overflow A</i>	19
6	Tubería descarga <i>Overflow B</i>	19
7	Hidrociclón 33[in] <i>Krebs DS33</i>	19
-	Dispositivo <i>PST</i> (registro tamaño de partícula en <i>overflow</i>)	19

**Figura 2.10:** Imagen lateral de una batería de hidrociclones (configuración en 45°).

2.3.4. Filosofía de Operación de las Baterías de Ciclones

La Filosofía de Operación se define como los criterios para operar adecuadamente los equipos de una planta de procesos, que fue concebida para una determinada capacidad de producción. De esta forma se asegura una correcta operación de equipos dependiendo de las condiciones de la materia prima que provea la mina y que ingrese a los molinos *SAG*.

El producto de bajo tamaño proveniente del molino *SAG* y del harnero se reparte, luego de pasar por equipos distribuidores, entre los sumideros de cada molino de bolas de bolas donde se debe mantener con aproximadamente un nivel de 65 % de pulpa y a un volumen constante para evitar el rebose del sumidero. El nivel adecuado de cada uno de ellos se logra por medio de un lazo control entre el nivel del sumidero y la rapidez de operación de las bombas bajo molino (capacidad nominal de 8 400 [m³/h]), cuya función es impulsar el mineral desde los sumideros hacia las baterías de ciclones con un porcentaje de sólidos constante. Dicho porcentaje se regula con la adición de agua en los sumideros, donde el nivel de llenado varía entre un 65 % y 75 %, por lo que si los niveles de llenado son superiores o inferiores, las bombas operarán a mayor o menor velocidad para mantener los niveles.

Una batería de ciclones debe entregar un producto final con granulometría media P_{80} de 145 μm y alrededor de un 27 % de sólidos a través de la descarga *overflow* del ciclón. El material que no es clasificado por la presión de operación de 10[*psi*], cae gravitacionalmente y se descarga por el *underflow* con alrededor 80 % de sólidos (Muñoz et al., 2017).

Para cumplir con la granulometría requerida por el circuito de flotación, cada ciclón cuenta con un sensor *PST (Particle Size Tracker)*, el cual mide el tamaño de partícula del flujo que pasa por una determinada sección transversal de tubería. Este dispositivo enviará la orden “cerrar” a la válvula cuchillo en el ducto de alimentación al ciclón si detecta una granulometría mayor a 180 [μm] en un periodo de 10 segundos. Dada esta señal, de inmediato el sistema abrirá la válvula de alimentación que lleve más tiempo cerrada, por lo tanto el ciclón que lleve más tiempo sin operar volverá a su funcionamiento. El fin de este lazo de control es normalizar la presión de clasificación en la batería, además de entregar una ventana de tiempo para inspeccionar el equipo en busca de anomalías.

2.4. Estado del Arte

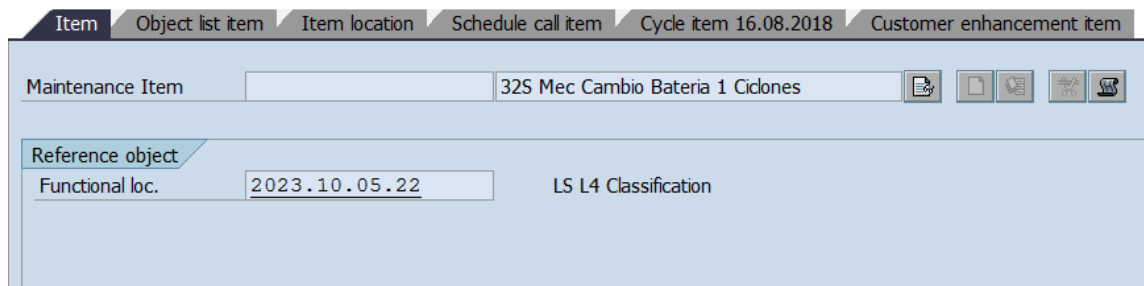
2.4.1. Mantenimiento de Ciclones en Laguna Seca

2.4.1.1. Plan de Mantenimiento en Sistema ISAP

El plan de mantenimiento existente para los ciclones de Laguna Seca, es de aspecto preventivo, gestionado a través del sistema ISAP. Este data del año 2014, donde contempla el cambio de todos los ciclones de la batería cada 32 semanas, al mismo tiempo. En la actualidad los ciclones no son cambiados simultáneamente, sino que de manera alternada según criterio del planificador sujeto a las inspecciones (en busca de roturas en revestimientos o embanques), por lo que el desgaste de los componentes es independiente entre ciclones. Esto quiere decir que el plan de mantenimiento actual es de tipo correctivo.

A continuación, se tiene una recopilación de lo que el plan actual de mantenimiento no considera para llevar un control adecuado de las condiciones de cada ciclón:

- Horas efectivas de operación
- Tonelaje procesado
- Granulometría del mineral procesado
- No existe una medición o alerta sobre condiciones del revestimiento del ciclón



The screenshot shows a software interface with a menu bar at the top containing: Item, Object list item, Item location, Schedule call item, Cycle item 16.08.2018, and Customer enhancement item. Below the menu bar, there is a form with the following fields:





Maintenance Item		32S Mec Cambio Bateria 1 Ciclones				
Reference object						
Functional loc.	2023.10.05.22	LS L4 Classification				

Figura 2.11: Plan declarado en sistema ISAP para el cambio de ciclones.

Esto deriva en que al llegar a las 32 semanas para el cambio de ciclón se han encontrado revestimientos con bajo nivel de desgaste e incluso ciclones sin uso. Además el tener un plan automático en sistema, gatilla rebajas de stock que no son reales ni rastreables, por lo que la planificación cae constantemente en desorganización de componentes. Tampoco se considera que todos los ciclones retirados son enviados a reparar, por lo que dentro de esas reparaciones se encuentran los ciclones sin uso.

Dado estos antecedentes:

- No se lleva un control de las condiciones operacionales de las partes de la batería.
- Falta de control de fallas y de la prevención de estas, generando en ocasiones una importante baja en cuanto a disponibilidad de hidrociclones.
- Descontrol de inventario y recursos monetarios que impactan indirectamente en la planificación del mantenimiento de otros equipos.
- Exposición innecesaria a riesgos al personal que realiza el cambio de ciclones.

Además, al no existir un plan debidamente establecido y acordado entre las áreas de planificación y ejecución, el mantenimiento de los ciclones es desorganizado, sin una pauta adecuada. Esto deriva en que se cambien ciclones a criterio del ejecutor sin haber una evaluación del revestimiento, que por programa semanal figure el cambio de uno y que al momento de retirar el usado se encuentre con muy poco uso, o que se encuentren ciclones con avanzado desgaste prontos a fallar. Evidentemente este descontrol genera una acumulación importante de equipos en patios a la espera de una reserva para llevarlos a reparación, como sucedió durante el estudio, que se llegó a tener una acumulación de 100 ciclones a la espera de reparación en patios.



Figura 2.12: Fotografía aérea del sector de tránsito de ciclones en patios de salvataje.

2.4.1.2. Inspección a Baterías

En planta, una vez a la semana, se realizan inspecciones donde se levantan fallas y condiciones que pueda presentar un ciclón. El operador del área acompañado de un mecánico revisan el exterior de los ciclones y sus componentes como válvulas, ductos y carcasas. Además, evalúan la descarga por el *apex*, para determinar si el equipo tiene una obstrucción u operación deficiente. Para esto se abre la válvula de alimentación (si es que no está operando) y se revisa visualmente la descarga de pulpa del *underflow*. Una vez hecha la revisión de todos los ciclones se envía un informe al área de Planificación, para que así se programen los recursos necesarios para cambiar o reparar por oportunidad los equipos declarados con problemas.

Las baterías de ciclones están siempre operando, por lo que las únicas veces que se realiza una inspección interna, donde puede evaluarse el desgaste de manera visual del revestimiento, es cuando hay una detención de planta o se bloquea un solo ciclón para desarmarlo por la parte superior.

Los hallazgos comúnmente detectados en las inspecciones se muestran en el siguiente capítulo.

2.4.1.3. Fallas Comunes y Mantenimiento de Componentes

A partir de un consolidado de fallas según inspecciones hechas entre marzo y agosto 2018 (Tabla A.1) se genera el siguiente gráfico de barras:

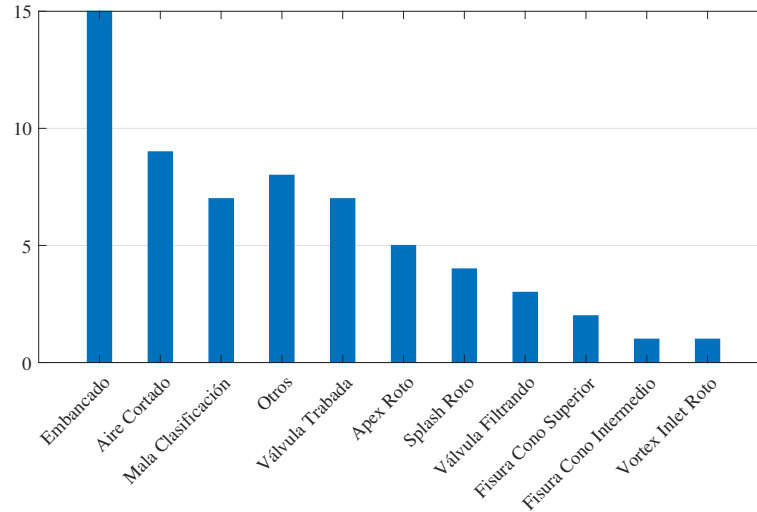


Figura 2.13: Hallazgos y fallas comunes registradas durante inspección en ciclones a partir de Tabla A.1.

Las fallas más comunes que implican el reemplazo o desarme del equipo son el embancamiento (primera barra) y una mala clasificación (tercera barra). Estas requerirán la programación de recursos materiales y humanos para mejorar la condición encontrada en el ciclón. En la categoría “Otros” se encuentran fallas que no requieren el cambio de ciclón, como por ejemplo roturas en ductos alimentación, señales erróneas de instrumentación o filtración por flanges.

Al revisar el equipo, para el caso de embancamiento, se encuentra:

- Desprendimiento del revestimiento en las secciones cónicas.
- Roturas en el *apex*.
- Elementos externos obstruyendo el *apex* como placas de acero, madera, carpetas plásticas y gomas de revestimientos de otros equipos de la planta (Figura 2.15 y Figura 2.16).

Para el caso de mala clasificación, se encuentra:

- Roturas en el revestimiento.
- Resaltes negativos (ver Subsubsección 2.4.2.4).

Respecto a los mantenimientos semanales, se enfocan en cambios de ciclones y ductos de descarga y/o alimentación, mientras que en las mantenciones con planta detenida (*shutdown*) se enfocan en cambios de manifold, de válvulas de alimentación y de ductos entre estos dos últimos. Las reparaciones que se le hacen por parte del proveedor al ciclón son básicamente el cambio completo del revestimiento, cambio de *apex* y pintado de la carcasa.

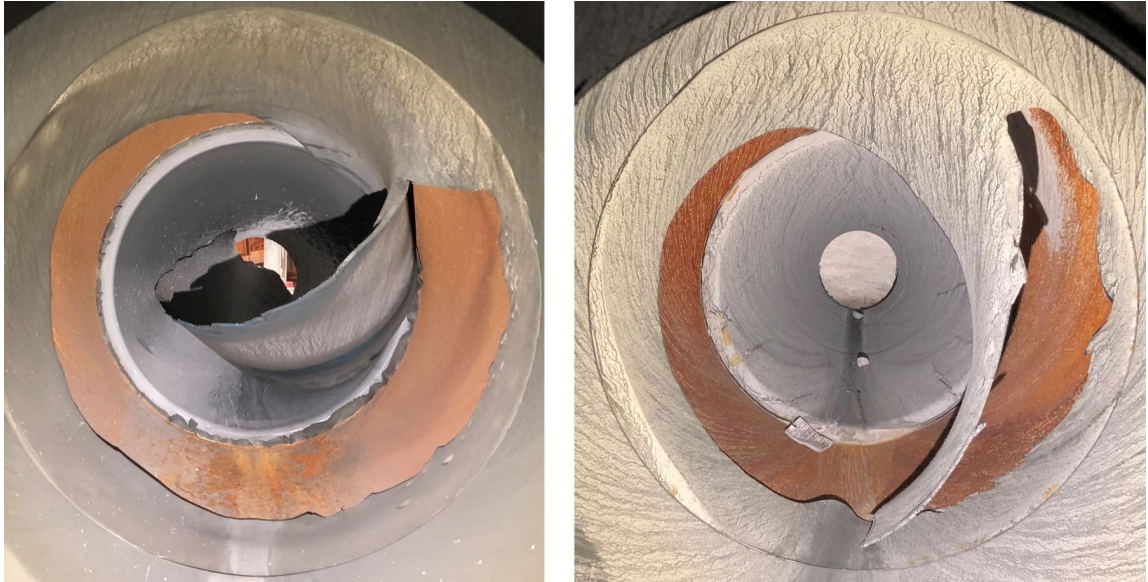


Figura 2.14: Desprendimiento de revestimientos en conos intermedios.



Figura 2.15: Obstrucción de *apex* por placa metálica externa.



Figura 2.16: Obstrucción de *apex* por carpetas plásticas externas.



Figura 2.17: Ciclón en condición de embancamiento.

2.4.1.4. Recursos para el Mantenimiento de Ciclones

La planificación para el mantenimiento de la batería implica, en general, considerar los siguientes recursos humanos:

- 2 Maestros mecánicos
- 1 Rigger mecánico
- 1 Operador puente grúa
- 1 Capataz
- 1 Supervisor
- 2 Maestros andamieros

Como recursos materiales se requiere:

- Ciclones nuevos para cambio
- Ductos de alimentación u *overflow*.
- Válvulas neumáticas
- Manifold
- Herramientas, pernos y accesorios.



Figura 2.18: Personal de empresa colaboradora en maniobras de izaje para el cambio de un ciclón.

2.4.1.5. Horómetros

Un horómetro es, básicamente, un instrumento para medir el tiempo. Para este estudio, un horómetro es un instrumento virtual confeccionado convenientemente a partir de la información captada por diferentes sensores presentes en equipos que no miden necesariamente tiempo. Generalmente, estos dispositivos virtuales cuentan con una interfaz gráfica, o de lo contrario, uno debe solicitarlos por medio de plantillas de cálculo como *Excel*. El horómetro creado o por generar, dependerá de la interpretación o provecho que un usuario otorgue a los datos que disponen los sensores en terreno. Es de vital importancia contar con un registro de tiempos de operación, para así evaluar comportamientos y tendencias operacionales, que permitan mejorar los planes de mantenimiento a los equipos.

Previo al inicio de este trabajo, no existían horómetros para los hidrociclones u otro método que indique el tiempo que llevan operando, pero durante el desarrollo, se intentó instaurar uno por parte del área de Planificación el cual se dejó de utilizar al poco tiempo ya que no era preciso y estaba mal confeccionado. Tampoco consideraba variables que le dieran confiabilidad a los resultados, como los trabajados en la Sección 3.3 para los datos obtenidos del sensor de válvula, ni tampoco las variables revisadas en la Sección 3.5 para confeccionar un horómetro confiable.

2.4.2. Equipos y Componentes de Estudio

2.4.2.1. Batería de Hidrociclones #1 (CS001)

Es recomendado trabajar con esta batería dado que el molino de bolas de bolas que trabaja con ella (MB001) es el que tiene el mayor *runtime* de los cuatro molinos que operan en Línea 1. Respecto a sus ciclones, 17 de los 19 que la componen superaron las 32 semanas que por plan define su cambio (ver tabla A.25). También durante el estudio se logró realizar el cambio de seis de estos ciclones, por lo cual se pudo realizar medición de espesores al solicitar el desarme de la parte más afectada del equipo (a revisar en sección 3.6).

2.4.2.2. Hidrociclón 10 Batería #2 (CY010 CS002)

Se escoge este hidrociclón para el estudio ya que es el único que falló hasta la rotura del revestimiento debido al desgaste normal por operación al cabo de un año y nueve días de instalado, entre el 07/07/2017 (fecha de instalación) y 16/07/2018 (fecha declarado como inoperable por mala clasificación). En su momento, el equipo se detuvo por embanque y al solicitar su revisión, se observó una rotura en el revestimiento del cono superior que atravesaba hasta la carcasa metálica. Este antecedente permite estudiar de inicio a fin los datos de granulometría y operación de este hidrociclón.

2.4.2.3. PST: Particle Size Tracking System

*CYCLONE*trac Particle Size Tracking (PST) o Sistema de Rastreo de Tamaño de Partículas en español, es un sensor fabricado por la empresa CiDRA® con el fin de entregar mediciones en tiempo real sobre el tamaño de partícula (P_{80}) que pasa por un ciclón. Además, como se mencionó en la sección 2.3.4, su función permite controlar la granulometría que se envía al área de flotación mediante un lazo cerrado entre lo registrado por este sensor y la válvula de alimentación de pulpa al ciclón.

El *PST* cuenta con un sensor dentro de un cabezal revestido en PVC que va insertado en la tubería de descarga del *overflow*. Sobre el cabezal impactan las partículas del fluido provocando una señal acústica la cual es procesada mediante un modelo de calibración, y que entregará finalmente el tamaño de partícula.



Figura 2.19: Rotura de revestimiento en cono superior, lo que provoca una nula clasificación.

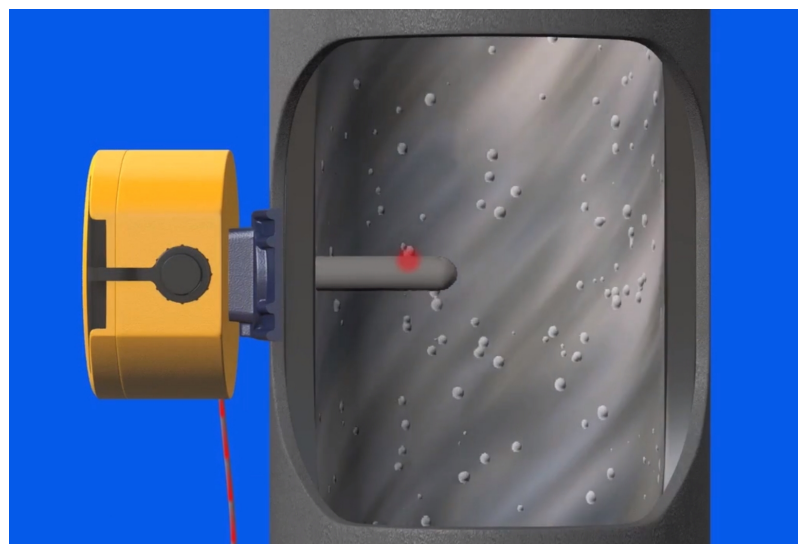


Figura 2.20: Representación del impacto de las partículas sobre cabezal del sensor *PST*.
(Fuente: Captura de pantalla de animación 3D por Cidra® (2018b))

Este sensor mide cada cuatro segundos el porcentaje de pulpa retenido en la malla #100 *Tyler*, la que tiene una equivalencia de abertura en malla hasta $149\ \mu\text{m}$ (Standard, 2017). Por ejemplo, en un instante dado se mide 22,4 %, lo que se significa que un 22,4 % de sólido con tamaño de partícula mayor o igual a $149\ \mu\text{m}$ está circulando por la tubería.

El dispositivo va montado en uno de los ductos que transporta el *overflow* desde el *vortex finder* en el ciclón hasta la canaleta colectora de bajo tamaño. Su instalación implica la perforación del ducto para que la probeta (protegida por una capa de caucho) quede en contacto con el flujo en circulación. La condición para que el sensor comience a registrar datos es que el tamaño de partícula en circulación sea mayor o igual a $75\ \mu\text{m}$.

Algunas características del dispositivo son (Cidra®, 2018a):

- Capacidad detección de partículas: $\geq 75\ \mu\text{m}$
- Taza de actualización (toma de muestras): 4 segundos
- Rango de temperatura del sensor: -10°C a $+55^{\circ}\text{C}$
- Cabezal del sensor: Sonda reforzada, acoplada a una caja metálica que contiene la electrónica.
- Cubierta del cabezal del sensor: Revestida en *PVC*, certificada hasta *IP66* y diseñada hasta *IP67*.



Figura 2.21: Cyclonetrac™ *PST*. En el cuerpo metálico de color amarillo se encofra la electrónica del dispositivo, mientras que la probeta se encuentra recubierta por caucho de color gris.



Figura 2.22: Montaje de PST (de color amarillo) en ducto de descarga *overflow*.

2.4.2.4. Resaltes en Revestimiento

El revestimiento al interior de un ciclón juega un rol fundamental, ya que dependerá del desgaste de este la calidad de clasificación obtenida. Generalmente se utilizan dos materiales: cauchos y cerámicos. El primero suele ser utilizado en la totalidad del ciclón, ya que funciona como elemento de sacrificio debido a su bajo costo. El segundo, si bien dura más que el caucho, es más costoso, por lo que es utilizado en zonas de mayor desgaste, en general.

En las uniones internas del revestimiento se da una condición particular importante para el funcionamiento adecuado de un ciclón, denominada resalte. Esta condición es una diferencia de altura entre revestimientos de dos secciones aledañas, por ejemplo, entre el cono superior e inferior. Se habla de resalte positivo cuando la altura del revestimiento anterior (tomando como referencia la dirección del flujo) es mayor que la del revestimiento siguiente, y de resalte negativo cuando la altura del revestimiento siguiente es mayor que la del anterior. El primero es la condición adecuada para operar un ciclón, ya que el flujo con material grueso seguirá bajando apegado a las paredes, mientras que al haber resalte negativo, el flujo tenderá a ser desviado hacia el centro provocando turbulencias y comportamientos desfavorables para la óptima clasificación, conocido como *by-pass* de gruesos. Esto ocurre porque el material que va en la periferia del ciclón es el de mayor granulometría, por lo que al pasar por un resalte negativo, este será desviado hacia el centro y luego transportado por las fuerzas ascendentes hacia el *vortex finder*, contaminando el fino con partículas gruesas.

Actualmente esta condición se da normalmente entre el cono intermedio y el inferior, porque el primero cuenta con revestimiento de caucho y el segundo con revestimiento cerámico. Este último tiene una mayor duración ante la abrasión, por lo que el cono intermedio tiende a disminuir su espesor por debajo del cono inferior, dando paso al resalte negativo. Se da la misma situación en los ciclones revestidos completamente con goma.

A continuación se muestran imágenes y esquemas sobre los resaltos:

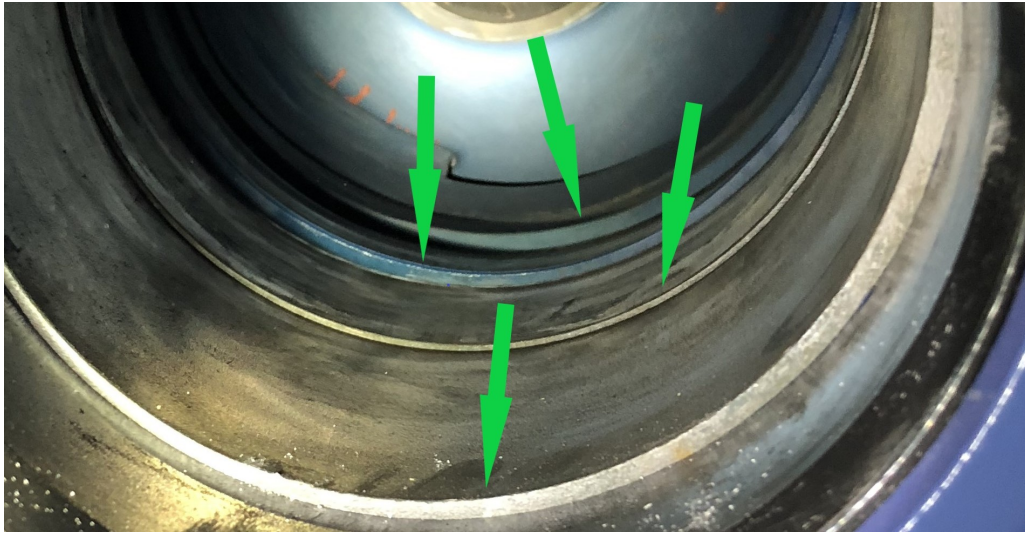


Figura 2.23: Vista interior de un ciclón nuevo desde el *apex*. Flechas verdes indican los resaltos positivos.

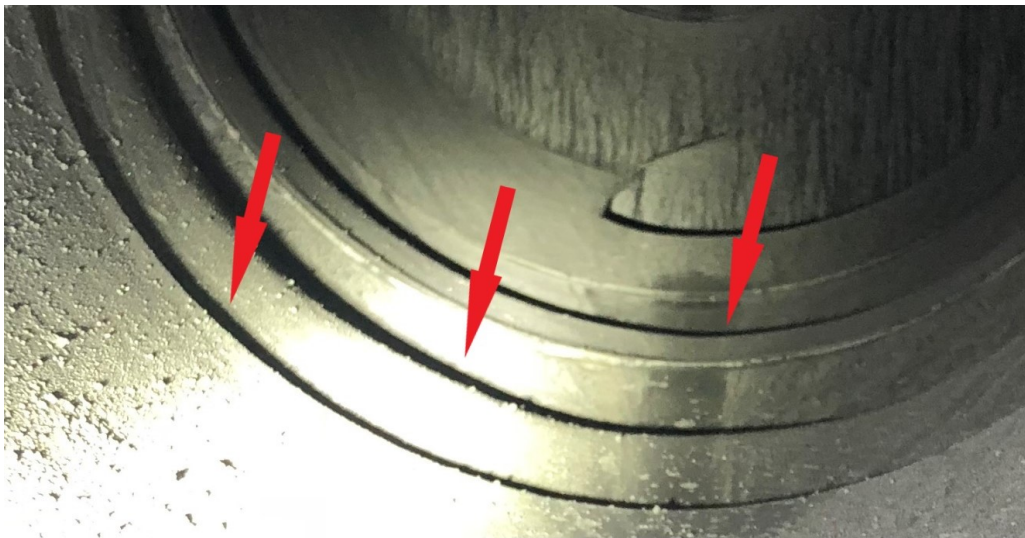


Figura 2.24: Vista interior de un ciclón retirado desde el *apex*. Flechas rojas indican los resaltos negativos.

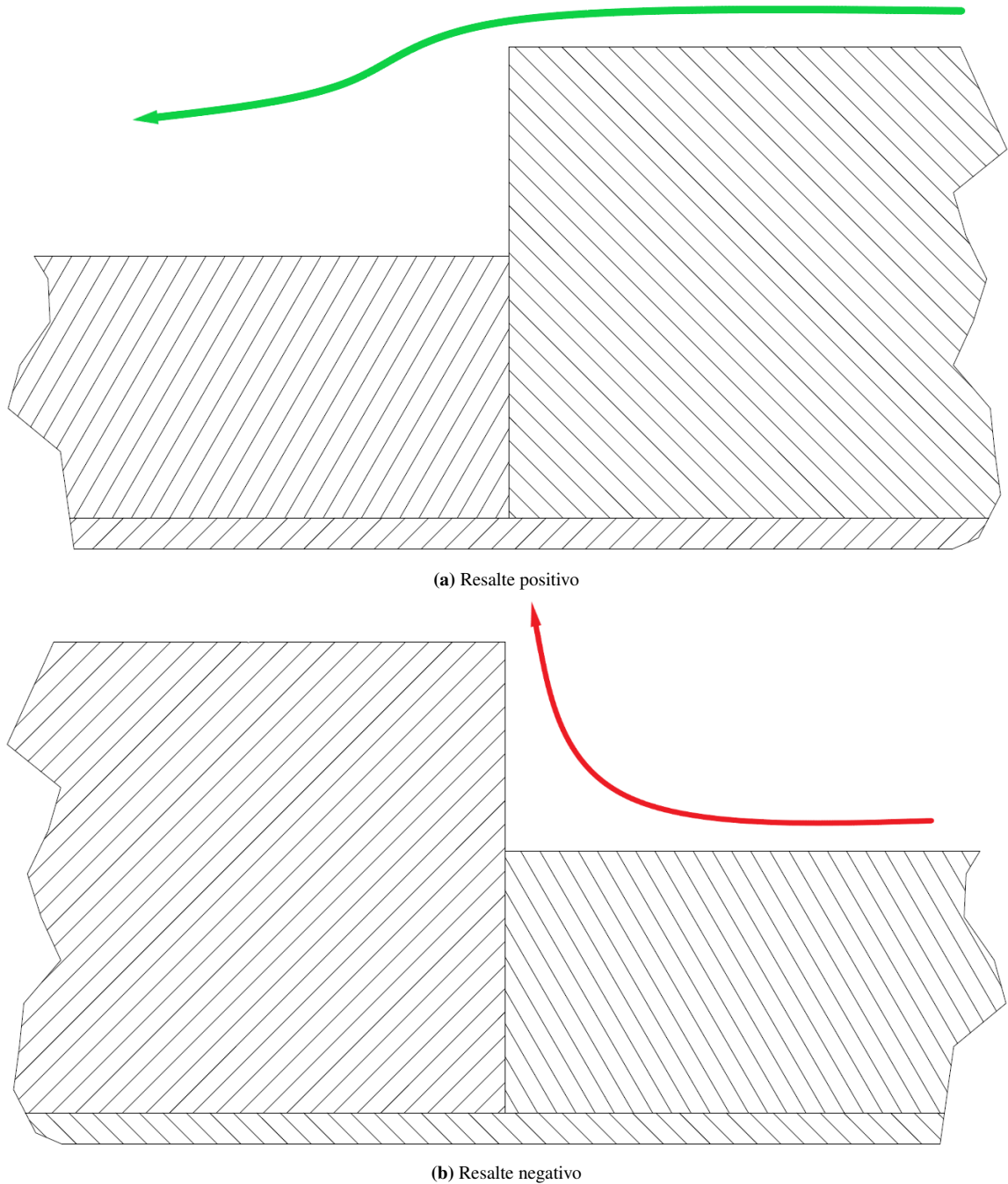


Figura 2.25: Dirección del flujo sobre el revestimiento con las dos condiciones de resaltes.

Esta realidad es la que motiva a proponer un método predictivo de detección en la Sección 3.7.

3 | Metodología

El procedimiento para estudiar la relación entre la granulometría de paso al interior del ciclón y el desgaste del revestimiento de este en el tiempo, además de un análisis para una propuesta tecnológica, consta de las siguientes etapas:

- Generación de series granulométricas a partir de los registros de dispositivo *PST*, promediados para intervalos de una hora en Ciclón 10 Batería 2.
- Generación de serie cruda a partir de los registros de dispositivo *PST*, contrastados con el registro del sensor de apertura y cierre de la válvula cuchillo que alimenta al Ciclón 10 de la Batería 2.
- Medición de desgaste en revestimientos de ciclones retirados.
- Experimentación para propuesta tecnológica.

3.1. Tags de Equipos

Para los puntos anteriormente mencionados, se debe generar una base de datos para los siguientes componentes:

- Sensor *PST* Ciclón 10 Batería 2
- Sensor Estatus Apertura y Cierre para Válvula de Corte Alimentación Ciclón 10 Batería 2.
- Sensores *PST* Ciclones Batería 1
- Sensores Estatus Apertura y Cierre para Válvulas de Corte Alimentación Ciclones Batería 1.

Los tags asociados a los ítems anteriores son:

Tabla 3.1: Tags para ciclones y sensores de Batería 1 y Batería 2.

Tag Equipo	Tag <i>PST</i>	Tag Sensor Apertura y Cierre
CY010 CS002	ELS.310-AIT-002-C10.PV	ELS.310-STAT-002-C10.PV
CY001 CS001	ELS.310-AIT-001-C1.PV	ELS.310-STAT-001-C1.PV
CY002 CS001	ELS.310-AIT-001-C2.PV	ELS.310-STAT-001-C2.PV
CY003 CS001	ELS.310-AIT-001-C3.PV	ELS.310-STAT-001-C3.PV
CY004 CS001	ELS.310-AIT-001-C4.PV	ELS.310-STAT-001-C4.PV
CY005 CS001	ELS.310-AIT-001-C5.PV	ELS.310-STAT-001-C5.PV
CY006 CS001	ELS.310-AIT-001-C6.PV	ELS.310-STAT-001-C6.PV
CY007 CS001	ELS.310-AIT-001-C7.PV	ELS.310-STAT-001-C7.PV
CY008 CS001	ELS.310-AIT-001-C8.PV	ELS.310-STAT-001-C8.PV
CY009 CS001	ELS.310-AIT-001-C9.PV	ELS.310-STAT-001-C9.PV
CY010 CS001	ELS.310-AIT-001-C10.PV	ELS.310-STAT-001-C10.PV
CY011 CS001	ELS.310-AIT-001-C11.PV	ELS.310-STAT-001-C11.PV
CY012 CS001	ELS.310-AIT-001-C12.PV	ELS.310-STAT-001-C12.PV
CY013 CS001	ELS.310-AIT-001-C13.PV	ELS.310-STAT-001-C13.PV
CY014 CS001	ELS.310-AIT-001-C14.PV	ELS.310-STAT-001-C14.PV
CY015 CS001	ELS.310-AIT-001-C15.PV	ELS.310-STAT-001-C15.PV
CY016 CS001	ELS.310-AIT-001-C16.PV	ELS.310-STAT-001-C16.PV
CY017 CS001	ELS.310-AIT-001-C17.PV	ELS.310-STAT-001-C17.PV
CY018 CS001	ELS.310-AIT-001-C18.PV	ELS.310-STAT-001-C18.PV
CY019 CS001	ELS.310-AIT-001-C19.PV	ELS.310-STAT-001-C19.PV

El tag *ELS.310-AIT* es seleccionado por defecto ya que es el único que entrega las mediciones de los dispositivos *PST*, mientras que la selección del tag *ELS.310-STAT* es porque entrega el estatus de la válvula de alimentación de los ciclones, con el fin de comprobar si efectivamente el equipo estuvo operando. Además, este da la posibilidad de confeccionar un horómetro simple, con el cual se podría llevar una contabilización de horas de operación.

3.2. Generación Base de Datos

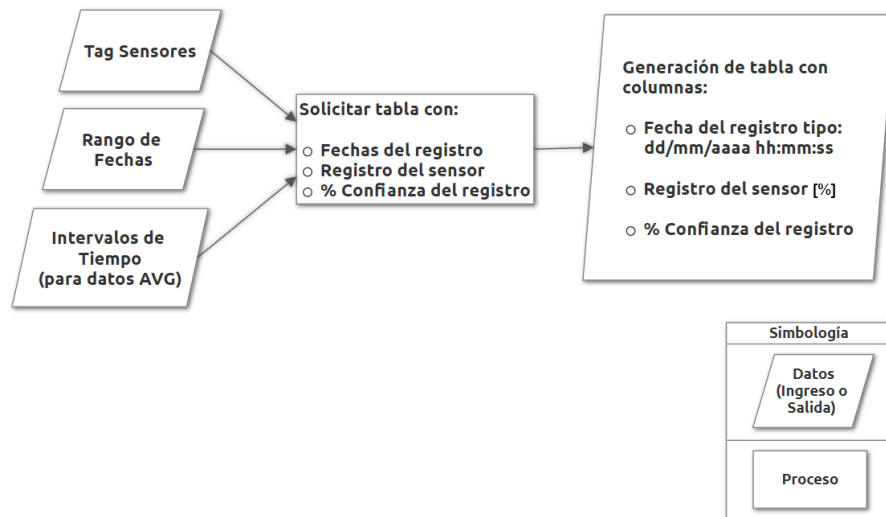
Para la generación de la base de datos, se obtienen los datos históricos de cada sensor a través del software *Honeywell Uniformance Process Studio PHD (Process History Database)* que, al tener un complemento en *Microsoft Excel*, va generando tablas con la información solicitada. Este software permite adquirir la data para rangos definidos de fechas y también para diferentes interpretaciones según lo que el usuario requiera, por ejemplo, obtención de datos en forma de promedios (data tipo *AVG*) para intervalos de segundos, minutos, horas o días; data de tipo cruda (*RAW*) que dependerá de la tasa de registro intrínseca del instrumento o equipo; data instantánea registrada para un determinado tiempo (*Snapshot*), entre otras combinaciones.

Una consideración hecha antes de generar las tablas, es que *Uniformance* permite solo obtener data hasta un horizonte máximo de seis meses hacia atrás desde la fecha actual, por lo que para un mayor horizonte se tuvo que solicitar la data al área de *Tecnología e Información* de la compañía, que fue solo el caso para el *CY010 CS002*, logrando obtener un rango de datos entre el 07/07/2017 y 16/07/2018. Para el resto de los ciclones en la batería 1, se obtuvieron las siguientes fechas hacia atrás:

Tabla 3.2: Fechas máximas de los registros de sensores obtenidas a través de *Uniformance*.

Tag Equipo	Fecha Máxima Obtenida
CY001 CS001	02-04-2018
CY002 CS001	23-05-2018
CY003 CS001	02-04-2018
CY004 CS001	02-04-2018
CY005 CS001	02-04-2018
CY006 CS001	23-05-2018
CY007 CS001	02-04-2018
CY008 CS001	02-04-2018
CY009 CS001	02-04-2018
CY010 CS001	21-06-2018
CY011 CS001	02-04-2018
CY012 CS001	02-04-2018
CY013 CS001	13-05-2018
CY014 CS001	05-04-2018
CY015 CS001	06-04-2018
CY016 CS001	02-04-2018
CY017 CS001	02-04-2018
CY018 CS001	12-04-2018
CY019 CS001	02-04-2018

Los siguientes esquemas describen la generación de las tablas:

**Figura 3.1:** Esquema general para la generación de tablas de datos.

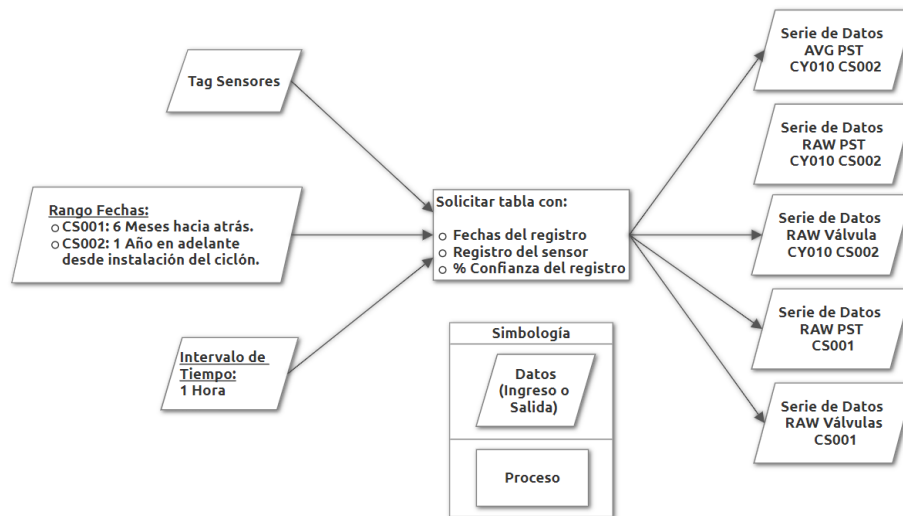


Figura 3.2: Esquema final con entradas y salidas.

3.3. Generación de Serie Promedio para Ciclón 10 Batería 2

Con la base de datos granulométricos del dispositivo *PST* promediados en intervalos de una hora (ver tabla A.2), se realiza un gráfico de la columna de datos de medición (*ELS.310-AIT-002-C10.PV – Average*) en función de las fechas registradas en cada uno de estos datos (*Timestamp*):

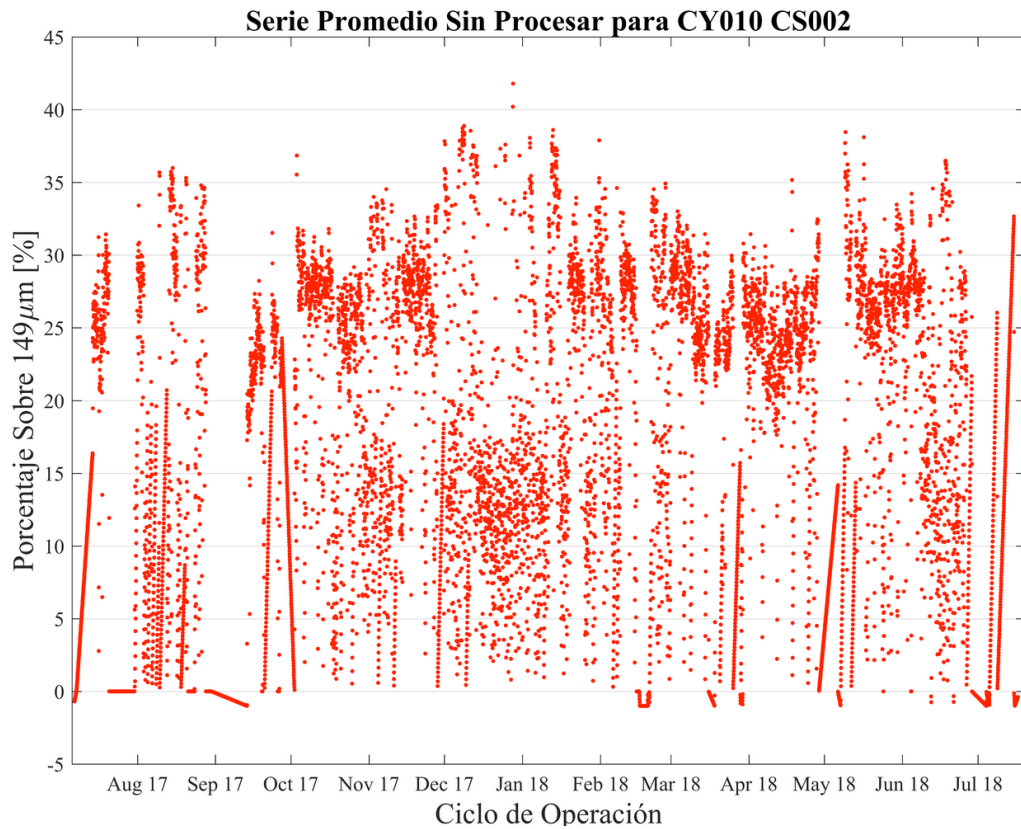


Figura 3.3: Gráfico de la Serie Promedio sin procesar del Ciclón 10 Batería 2.

Del gráfico se observan:

- Rectas positivas (en su mayoría) y negativas, claras y marcadas.
- Valores negativos para el registro del *PST*.
- Valores iguales a cero que acompañan a estos valores negativos.

Al revisar la base de datos se observa lo siguiente:

- Valores menores a 100 % en la columna de confianza del dato (*ELS.310-AIT-002-C10.PV - Average – Confidence*).
- Al examinar los datos que conforman las rectas positivas y negativas vistas en la Figura 3.3, se encuentra que el valor de la resta entre dos registros consecutivos es igual y constante.

Por esto, se realiza un procesamiento de esta base de datos contemplando los siguientes puntos:

- Se eliminan todas las filas que en alguna de sus celdas de la columna *ELS.310-AIT-002-C10.PV - Average*, contengan valores menores a cero, ya que este valor no pertenece al rango de medición del sensor.
- Se eliminan todas las filas que en alguna de sus celdas de la columna *ELS.310-AIT-002-C10.PV - Average* contengan valores iguales a cero y, considerando que estos son datos promediados en una hora, significa que en ese intervalo de tiempo no existió flujo en el ciclón.
- Se eliminan todas las filas que en alguna de sus celdas de la columna *ELS.310-AIT-002-C10.PV - Average – Confidence* contengan valores menores a 100 %, para asegurar el trabajo con datos certeros y de confianza.
- Para descartar las rectas positivas y negativas detectadas en la Figura 3.3 se eliminan todas las filas que, al restar dos celdas consecutivas de la columna *ELS.310-AIT-002-C10.PV - Average*, entregue un valor igual y constante para un mínimo de dos resultados consecutivos (considerando hasta la milésima del valor en celda).

La Serie Promedio final procesada para el Ciclón 10 de la Batería 2 se identifica como *PST 002 C10 AVG 100* conformada por:

- 2 Columnas
- 3115 Filas

Similar a la base anterior, se procesó la serie de datos generada para el sensor de la válvula de corte que alimenta al ciclón (ver Tabla A.3). Esta también contiene tres columnas y la principal (*ELS.310-STAT-002-C10.PV - Raw*) contiene valores 1 y 0, los que se interpretan de la siguiente manera:

Tabla 3.3: Significado de los datos que entrega el sensor de apertura y cierre.

Registro Sensor	Significado
1	El sensor al registrar el valor 1, indica que la válvula está completamente abierta.
0	El sensor al registrar el valor 0, indica que la válvula está completamente cerrada.

El tratamiento otorgado a esta serie consiste en eliminar las filas que:

- En alguna de sus celdas de la columna *ELS.310-STAT-002-C10.PV - Raw – Confidence*, contengan valores menores a 100 %.
- En alguna de sus celdas de la columna *ELS.310-STAT-002-C10.PV - Raw*, contenga valores menores a cero, ya que no tiene interpretación alguna y además coincide que este valor se presenta luego de que la válvula está completamente cerrada.

Al ser una tabla de datos crudos (*RAW*), se utiliza tanto para contrastar registros de la serie promedio como de la serie cruda (siguiente sección). También, se tendrá certeza de que el ciclón estuvo operando y que el registro de apertura y cierre son exactos para las determinadas fechas y horas.

La serie procesada se identifica como *STAT 002 C10 RAW 100*, conformada por:

- 2 Columnas
- 8336 Filas

3.4. Generación de Serie Cruda para Ciclón 10 Batería 2

Análogo a la Serie Promedio, el tratamiento a la base de datos para generar la Serie Cruda (ver Tabla A.4) es:

- Eliminar todas las filas que en alguna de sus celdas de la columna *ELS.310-AIT-002-C10.PV - Raw* contengan valores menores a cero.
- Eliminar todas las filas que en alguna de sus celdas de la columna *ELS.310-AIT-002-C10.PV - Raw - Confidence* contengan valores menores a 100 %, para asegurar el trabajo con datos certeros y de confianza.
- Para descartar las rectas positivas y negativas (que también se detectaron para esta serie) se eliminan todas las filas que, al restar dos celdas consecutivas de la columna *ELS.310-AIT-002-C10.PV - Raw*, entregue un valor igual y constante para un mínimo de dos resultados consecutivos (considerando hasta la milésima del valor en celda).

Luego, se hace una comparación entre esta serie y la del sensor de válvula de alimentación, encontrándose que:

- Al existir un cierre completo de válvula en la serie *STAT 002 C10 RAW 100* coincide que, para el mismo día y hora, se registra un valor cero en ambas series.
- Para cada valor cero registrado en la columna *ELS.310-AIT-002-C10.PV - Raw*, se tiene que los siete datos precedentes a esta medición cero, son efecto del cierre de la válvula, por lo que no son parte de la operación normal del ciclón.

En efecto, al tratamiento inicial de esta serie se añade:

- La eliminación de los valores cero y sus siete datos precedentes, dado que no agregan valor para un eventual análisis de granulometría para determinar alguna relación con el desgaste.

De este modo, se obtiene una base de datos procesada que es dividida en cuatro partes debido a la gran cantidad de datos y peso del archivo original. Al igual que la generación anterior, se elimina la columna *ELS.310-AIT-002-C10.PV - Raw - Confidence* por tener la totalidad del 100 % de confianza en los registros.

Las bases de datos generadas son:

- PST 002 C10 RAW 100 1: 2 Columnas y 1 021 823 Filas
- PST 002 C10 RAW 100 2: 2 Columnas y 1 013 722 Filas
- PST 002 C10 RAW 100 3: 2 Columnas y 921 783 Filas
- PST 002 C10 RAW 100 4: 2 Columnas y 590 713 Filas

3.5. Confección de Horómetro

Para que un horómetro sea útil, debe entregar información acorde a la realidad, por lo que en su creación está la mayor inversión de tiempo con tal de que sea confiable en la práctica. Para este trabajo, se ideó un horómetro simple y uno mejorado.

3.5.1. Propuesta Horómetro #1

La base de este horómetro se sustenta en el uso de los datos registrados por el sensor de apertura y cierre de válvula de corte de la alimentación al ciclón (*ELS.310-STAT-XXX-CYY.PV*), mismo tag mencionado en la Sección 3.3, con la diferencia que en esta lógica se comprueba efectivamente que los sensores de fin de carrera estén funcionando correctamente.

A continuación, la lógica utilizada:

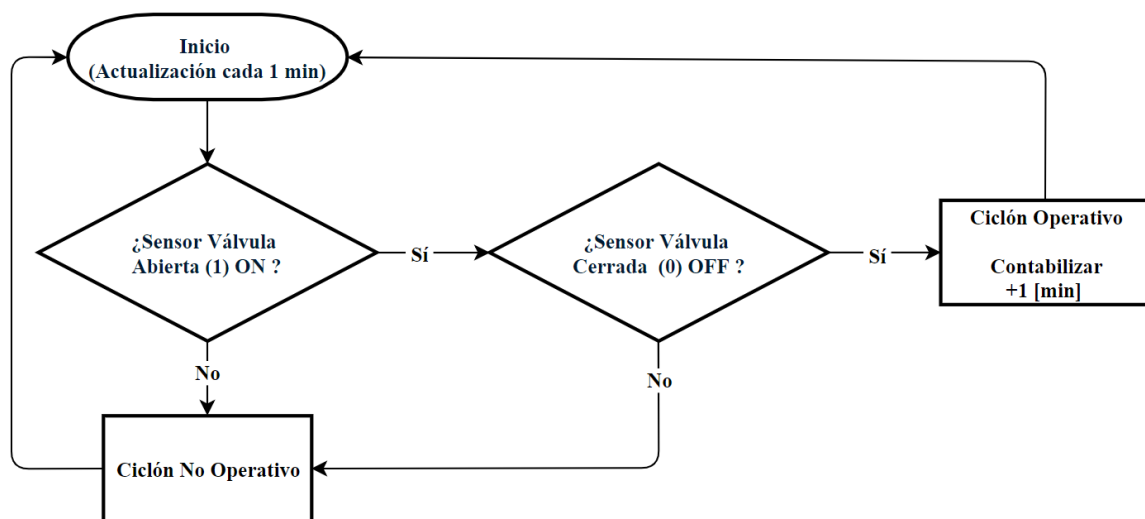


Figura 3.4: Diagrama lógico de la propuesta de horómetro #1.

3.5.2. Propuesta Horómetro #2

Yendo más allá en cuanto a la confiabilidad del dato que pueda entregar un horómetro, se modifica la primera propuesta, creando así una lógica que permita cuantificar el tiempo real de la operación del ciclón cuando efectivamente esté clasificando pulpa, y no solo procesando agua.

A continuación, la lógica modificada y mejorada en base al diagrama de la 2.7:

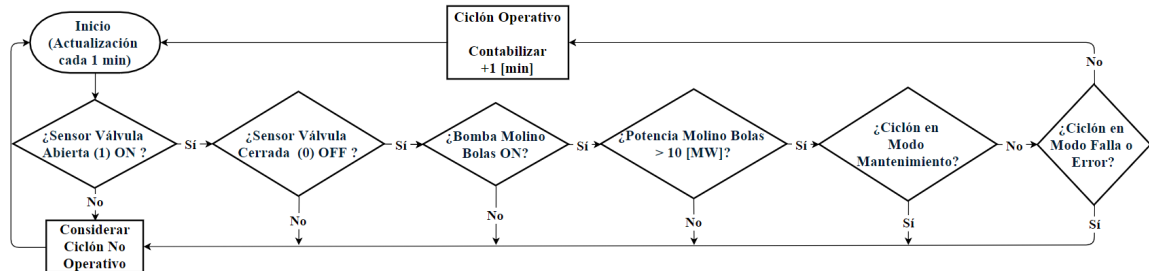


Figura 3.5: Diagrama lógico de la propuesta de horómetro #2.

La implementación de este horómetro sería primero mediante la programación de la lógica descrita en el diagrama anterior, basada en datos de la filosofía de operación de Muñoz et al. (2017). Posteriormente debe ser incorporada al Distributed Control System (DCS). De esta manera, el usuario podrá saber las horas de operación de todos los ciclones de la planta.

3.6. Medición de Desgaste en Revestimientos de Ciclones Retirados

Durante el estudio, se consideró evaluar el espesor de las zonas con más desgaste en el revestimiento interior de los ciclones cuando estos eran retirados por programa, logrando medir así 5 de 7 ciclones, dado que dos eran con revestimiento cerámico y este material no es el foco de estudio. Cuando se cambiaban ciclones, el saliente era trasladado al taller de mantenimiento donde tras una inspección visual hacia el interior por el *vortex*, se detectaba dónde estaba la parte más crítica. Posteriormente se procedía a desarmar el ciclón en la sección afectada y a retirar el revestimiento de caucho. Este se cortaba en franjas rectangulares a lo alto del cono, con un ancho aproximado de 150 milímetros (ver Figura 3.8). Considerar que el espesor inicial del revestimiento es 1,75[in], equivalente a 44,45[mm].

La metodología para hacer las mediciones fue la siguiente:

1. Definir plantilla de 100 mm x 100 mm con 9 puntos de medición enumerados en su interior (ver Figura 3.6).
2. Marcar esta plantilla en el revestimiento, cerciorando que el punto más crítico quede dentro en alguno de los puntos de medición.
3. Si la zona a medir estaba presente en un declive, los puntos de medición 1, 2 y 3 se dejaban en la parte más alta y el resto hacia la parte más baja.
4. Los puntos marcados que no eran pasantes en el caucho (la mayoría), fueron perforados con una broca de 2 milímetros de diámetro.
5. Los puntos que coincidían en los bordes del revestimiento se midieron con las patillas principales del pie de metro (*Mitutoyo* modelo 530-122: rango 0 - 150 [mm] y resolución 0.02 [mm]).
6. Los puntos que se perforaron, se midieron con la varilla de profundidad del pie de metro.

Cada uno de los puntos medidos se registró en la Tabla A.5 de anexos. Con estas mediciones se hace un promedio de los nueve puntos medidos por ciclón y el valor obtenido se le resta al espesor inicial de 44,45[mm]. Finalmente, este valor es dividido por el tiempo que estuvo instalado, obteniéndose una tasa de desgaste en días y horas para la Batería 1 (ver Tabla 4.3 en la Sección 4.3).

Para el *CY010 CS002* se realizó un cálculo similar, añadiéndole a la Tabla 4.2 (Análisis del Desgaste) el tiempo de operación obtenido a partir de lo visto en la Sección 3.4 con los datos de apertura y cierre de válvula alimentación, y la generación de un horómetro según la Subsección 3.5.1.

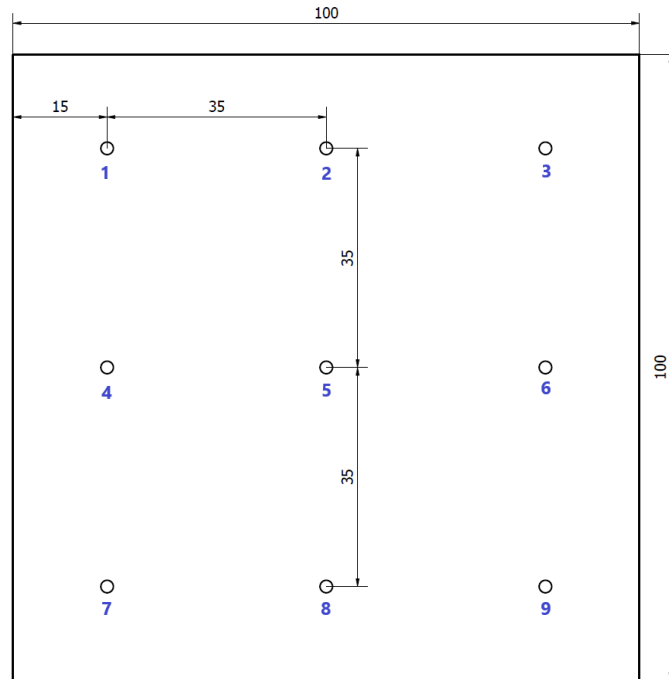


Figura 3.6: Plantilla utilizada para marcar puntos de medición en revestimientos retirados.



Figura 3.7: Personal de empresa colaboradora retirando revestimiento de caucho que tenía embancado al ciclón.



Figura 3.8: Franjas seccionadas de caucho proveniente de cono intermedio.

3.7. Propuesta Tecnológica

Como se evidenció en la Subsubsección 2.4.2.4, la condición de resaltes negativos es desfavorable para la operación óptima de un hidrociclón, por lo que esta realidad es la que motiva a buscar una propuesta tecnológica para predecir la existencia de resaltes en el revestimiento y así reaccionar a tiempo para un mantenimiento.

3.7.1. Idea Original

El concepto original nace de la necesidad de predecir el desgaste progresivo en el revestimiento del ciclón, desgaste que se iría alarmando por etapas dependiendo de la profundidad de deterioro. Esta alarma consistía en disponer de un enmallado con cables de cobre entremedio y a lo largo del revestimiento cónico a distintas profundidades (tipo sandwich), dejando terminales de esta malla por fuera de la carcasa del equipo conectados a luces indicadoras o directamente al sistema *DCS* para rastrear la alarma. El funcionamiento consistía en que a medida que la abrasión de la pulpa fuese desgastando la goma y eventualmente llegase al nivel de la capa de cables, estos se cortasen por el desgaste. Sin embargo, lograr implementar esta opción se hizo difícil, ya que implica modificar o crear nuevas matrices para las gomas por parte de la empresa fabricante.

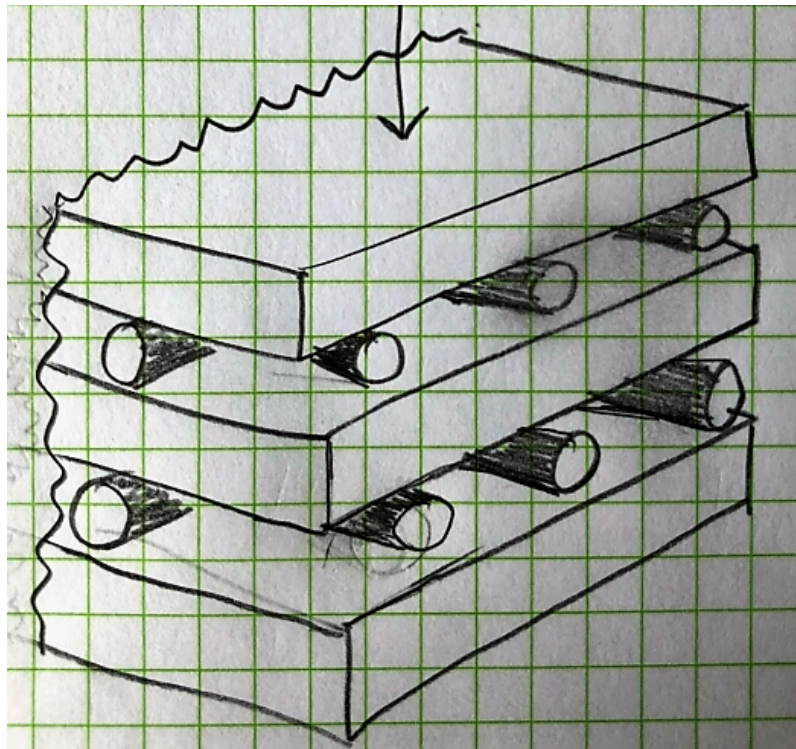


Figura 3.9: Ilustración de la idea original para enmallado de caucho.

Otra idea inicial fue utilizar cables de histéresis en vez de los de cobre e intentar obtener más variables que se puedan asociar a la operación del ciclón. Esta configuración requería un enmallado exterior adosado a la carcasa, pero la idea fue prontamente descartada ya que, como los ciclones tienen altas vibraciones, estos alambres captarían mucha información lo que dificultaría poder discriminar variables y asociarlas al proceso. Además, estas pruebas no aportarían valor agregado a las investigaciones sobre cables de histéresis que se hacen hoy en día en el Departamento de Ingeniería Mecánica, pues no es el foco de estudio.

3.7.2. Propuesta

A partir de la maduración de las ideas anteriores y de la problemática vista en la Subsubsección 2.4.2.4 respecto a los resaltes, se da con la siguiente propuesta:

1. Detectar y predecir la generación de resaltes negativos mediante insertos de alambres metálicos al revestimiento.
2. Generar una tabla con ensayos de impacto de distintas masas y formas sobre los alambres de diferentes diámetros, con el fin de asegurar el funcionamiento de la propuesta y que no exista un corte prematuro por impacto.
3. Que la tabla generada sea utilizada como referencia, eventualmente, en pruebas de impacto sobre alambres de histéresis.

Se propone implementar un dispositivo que permita detectar la formación de resaltes negativos y monitorear el desgaste progresivo del revestimiento en el tiempo. Este consiste en insertar filamentos o alambres de cobre u otro metal en la periferia del ciclón, entre los flanges que unen a los conos entre sí (Figura 3.10), desde el borde del revestimiento del cono anterior hasta el borde interno de la carcasa del cono siguiente (Figura 3.12), como se muestra en las figuras siguientes:

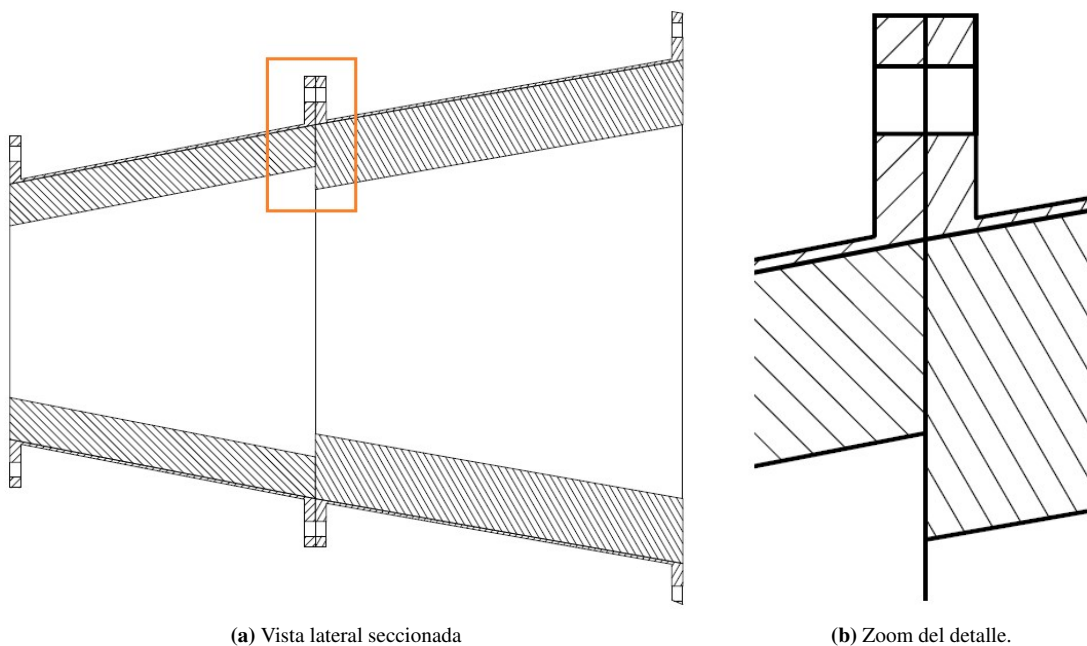


Figura 3.10: Vista seccionada de dos conos, donde se muestra la zona propuesta para el inserto de alambres.

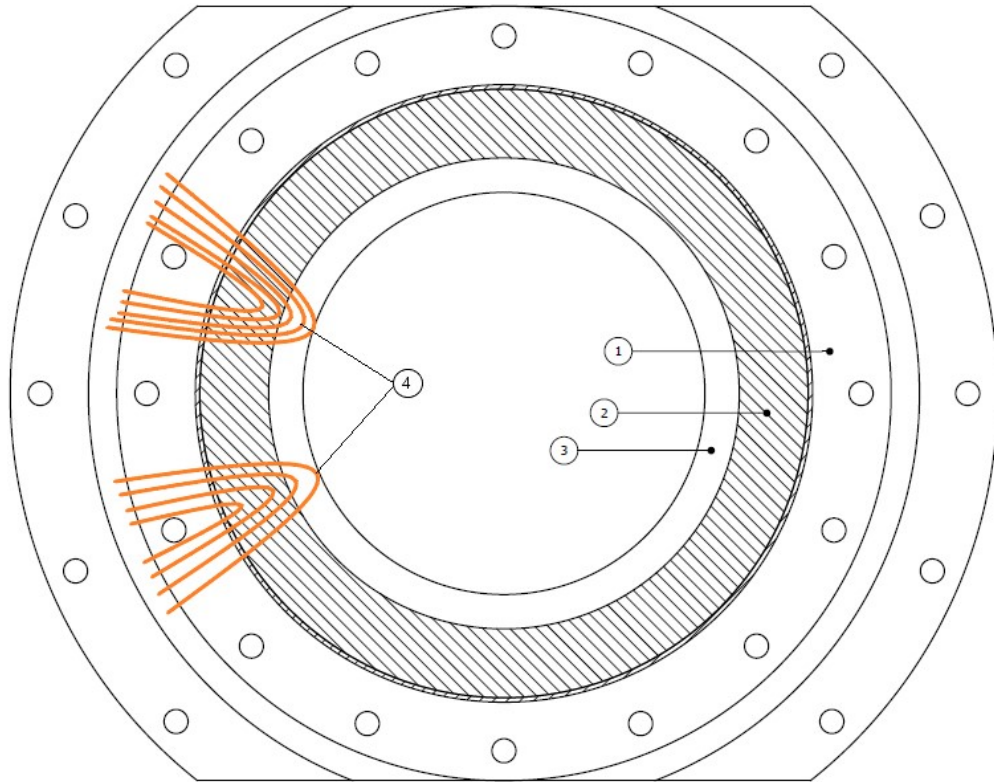


Figura 3.11: Vista en corte del cono inferior e intermedio.

En la Figura 3.11 se muestra: 1) carcasa cono intermedio (anterior); 2) revestimiento en cono inferior (siguiente) en corte; 3) resalte positivo de revestimiento del cono intermedio; 4) configuración inserto.

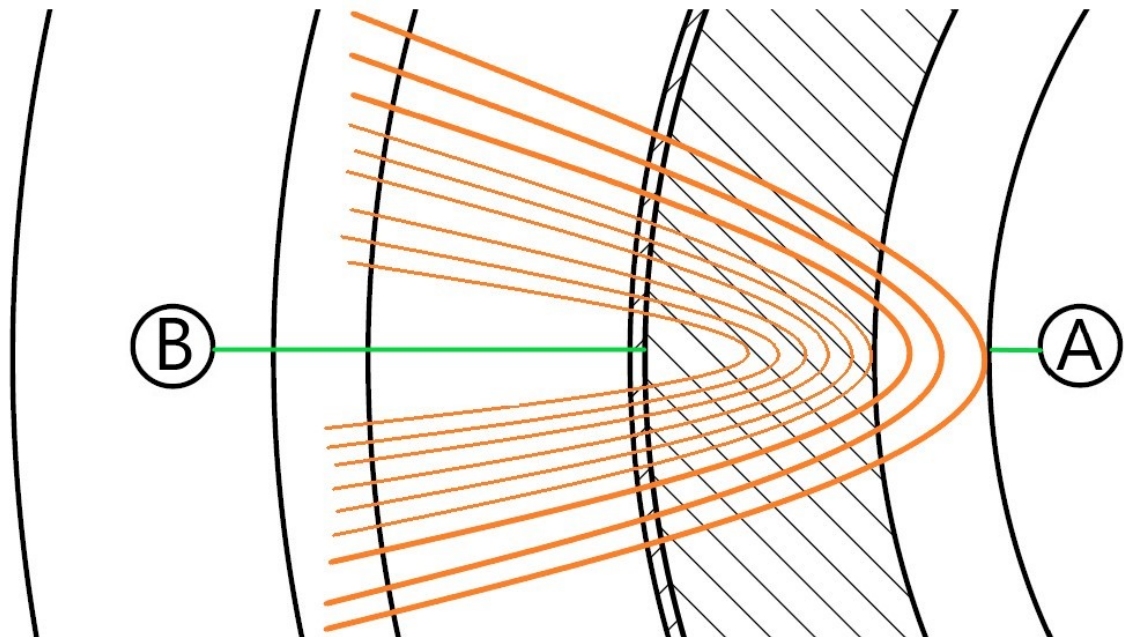


Figura 3.12: Vista en detalle del inserto.

En la Figura 3.12 se muestra en detalle la zona que abarca el inserto, desde A) borde interior del revestimiento del cono anterior, hasta B) borde interno de la carcasa del cono siguiente.

A medida que el tiempo del ciclón transcurre operando y el revestimiento vaya disminuyendo su espesor, la pulpa comenzará a desgastar el alambre, generando un corte en este. Esta condición será detectada mediante el uso de un *tester* por medio de la función *continuidad* incorporada en el instrumento y la conexión de las puntillas *COM* e *Input* a los extremos del inserto metálico. Si el cable no se encuentra cortado, el *tester* emitirá un pitido y en pantalla se mostrará un valor pequeño de resistencia, mientras que si el cable se encuentra cortado, el instrumento no emitirá pitido.



Figura 3.13: Imagen del *tester* digital marca *Micolab* modelo *MCL 4547*.

3.7.3. Ensayos de Impacto

Esta propuesta considera ensayos de impacto con el fin de simular golpes al interior del ciclón producto de agentes externos distintos a la pulpa, como el ingreso de placas, rocas con sobretamaño o chip de bolas, con el fin de corroborar si los insertos sufrirán algún tipo de corte en el alambre.

Antes de iniciar las pruebas, se tienen los siguientes parámetros útiles:

- Caudal aproximado de alimentación a ciclón (Q_w): 800 [m³/h]
- Presión de operación aproximada: 10 [psi]
- Diámetro ducto de alimentación (d): 406,4 [mm]

$$v_{ingreso} = \frac{Q_w}{3600\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (3.1)$$

Ingresando el caudal y diámetro (en metros) a la Ecuación 3.1 se obtiene que la rapidez aproximada de ingreso de la pulpa ($v_{ingreso}$) y su contenido al ciclón es de 1,7 [m/s]. Se sabe además que las partículas de pulpa que superan la fuerza de arrastre hacia el centro del *vortex*, son llevadas hacia las paredes del revestimiento, donde descenderán y evacuarán por el *apex*, por lo que cualquier objeto más pesado tenderá a seguir el mismo comportamiento. La idea es ensayar el impacto de distintos pesos (variando formas y masas) sobre una configuración de alambre con y sin capas protectoras de caucho (pruebas sin caucho como el caso más desfavorable), permitiendo simular el golpe de objetos al interior del ciclón con el fin de comprobar si el inserto propuesto es capaz de resistir la operación del equipo.

La altura escogida para las pruebas la da el largo (por formato de venta en el comercio) de la tubería adquirida equivalente a 3 [m]. Este ducto que funcionará como protección ante el viento es montado sobre un listón como soporte, el cual tiene un largo de 3,2 [m], dejándose esta altura como la final. A partir de esto es necesario comprobar que, para la altura de prueba seleccionada, la rapidez de impacto de los objetos sobre la plataforma debe ser mayor a 1,7 [m/s].

Dada la altura de caída y que el área superficial de los objetos a lanzar es menor, se decide despreciar el efecto del roce del aire para determinar la rapidez en cada uno. Para este caso, se conoce la Ecuación 3.2 para la rapidez de impacto justo antes de tocar la plataforma. En esta fórmula solo influye la gravedad y altura de caída libre.

$$v_{impacto} = \sqrt{2gh} \quad (3.2)$$

Con estas consideraciones se tiene que la rapidez de impacto para la menor masa, de 127 gramos (Id-1 de la Tabla 3.4), es de 7,92 [m/s], cumpliendo con el requisito propuesto para cualquiera de los pesos en la tabla.

Los elementos y características que conforman la plataforma de pruebas son los siguientes:

- Base de impacto de madera prensada de 35 [cm] ancho x 40 [cm] largo x 1,5 [cm] altura.
- Ducto PVC de 3 [m] de largo por 70 [mm] de diámetro interno.
- Listón de madera de 3,2 [m] de largo con sección de 65 [mm] x 20 [mm] para soportar ducto y dejarlo a 20 [cm] sobre la base de impacto.
- Alambres de cobre de \varnothing 0,52 [mm] x 1 [m] largo.
- Alambres de cobre de \varnothing 0,20 [mm] x 1 [m] largo.
- Alambres de cobre de \varnothing 0,10 [mm] x 1 [m] largo.
- Objetos con distintas formas y masas (ver Tabla 3.4).
- Discos de pesas con distintas masas (ver Tabla 3.4).
- *Tester* digital *Microlab MCL 4547* para medir continuidad con resistencias en cable menores a 50 ohm.
- Tornillos de fijación para alambres sobre base de impacto.
- Caucho *PBC* de 2 [mm] espesor de 13 x 13 [cm].
- Caucho *PBC* de 10 [mm] espesor de 13 x 13 [cm].
- Caucho *PBC* de 12 [mm] espesor de 13 x 13 [cm].
- Balanza gramera para un máximo de 5 [kg], de resolución 1 [gr].

Se posiciona la base en el suelo y sobre ella se dibuja un área de impacto de 13 [cm] x 13 [cm]. En esta área se disponen tornillos en la periferia que servirán como guías del cableado a realizar. Este trazado de cables irá conectado por un extremo a la terminal común (*COM*) del *tester* y el otro extremo a la terminal de entrada (*Input*), formando un circuito cerrado que emite un pitido permanente indicando la continuidad del alambre. Luego se posiciona el ducto sobre esta área de pruebas, quedando a 20 centímetros por sobre la superficie de la base. Este tubo cumple la función de protección contra corrientes de viento para que los objetos con masas menores no fuesen desviados. En todos los lanzamientos se evitó que la carga tocara las paredes del tubo para que así esta no perdiese rapidez producto del roce. Para los objetos más pesados (sobre un kilogramo) se descartó el uso de un ducto debido a que estos difícilmente se desviaban por el viento.



Figura 3.14: Imagen general del montaje de la plataforma de pruebas.



Figura 3.15: Imagen del montaje del *tester* conectado a alambres.

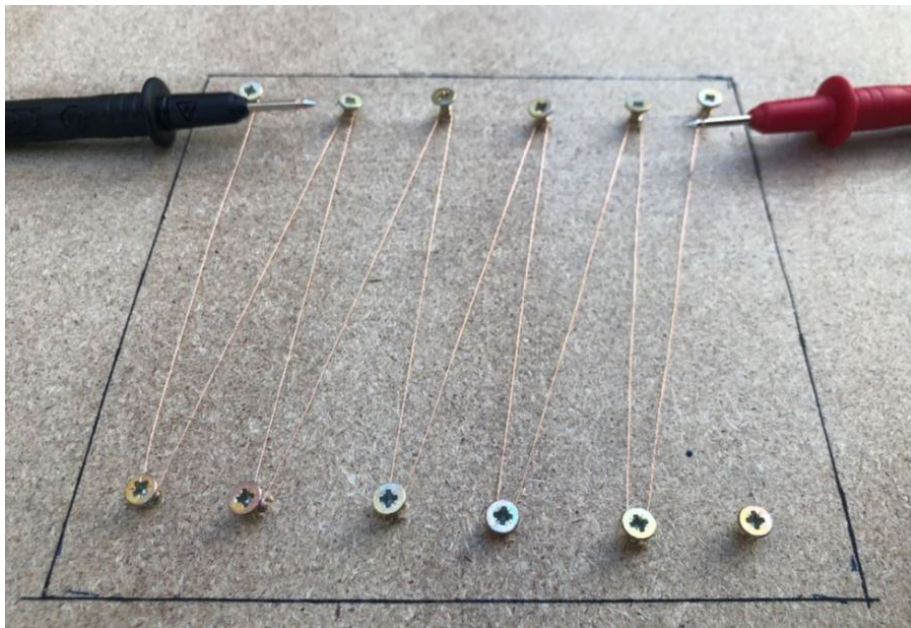


Figura 3.16: Imagen de la configuración de los alambres.



Figura 3.17: Imagen del montaje del caucho sobre la plataforma de pruebas.

Los ensayos se dividieron en dos categorías, una de pesos con forma irregular, llamada Categoría 1 (a modo de simular objetos no comunes que ingresen al ciclón) y otra de pesos con formas regulares llamada Categoría 2. Para ambas categorías se experimentó con los diferentes diámetros de cables y espesores de caucho.

En pruebas de Categoría 1 que se usaron dos o más objetos juntos, fueron dispuestos a lo largo y se unieron con cinta de papel.



Figura 3.18: Imagen de las rocas y bolas utilizadas para los ensayos.



Figura 3.19: Imagen del cuarzo de 4 kilogramos.



(a) Disco de 2,5 kilogramos.



(b) Disco de 4 kilogramos.

Figura 3.20: Discos de mancuernas utilizados para los ensayos de la Categoría 2.

Los objetos utilizados para impactar los alambres se muestran a continuación:

Tabla 3.4: Tabla con los objetos y masas utilizadas en los ensayos.

Id	Peso	Masa [gr]	Descripción
1		127	Bola acero remolienda
2		129	Bola acero remolienda
3		145	Roca granito
4		148	Bola acero remolienda
5		293	Roca cuarzo 1
6		300	2x Bolas acero remolienda
7		447	3x Bolas acero remolienda
8		630	3x Bolas acero remolienda + Roca oscura
9		923	3x Bolas acero remolienda + Roca oscura + cuarzo 1
10		1 067	3x Bolas acero remolienda + Roca oscura + cuarzo 1 + granito
11		4 000	Roca cuarzo 2
12		1 500	Disco hierro mancuerna Ø 130 [mm] x 20 [mm] alto
13		1 610	Barra mancuerna Ø 25 [mm] x 350 [mm] largo
14		2 500	Disco hierro mancuerna Ø 160 [mm] x 25 [mm] alto
15		4 000	Disco plástico relleno de Ø 200 [mm] x 45 [mm] alto

La secuencia de ensayo fue la siguiente:

1. Configurar el alambre de cobre en los tornillos guía dentro del área de pruebas.
2. Conectar el *tester* a los extremos del alambre.
3. Ubicar el peso de prueba a 320 centímetros de altura.
4. Centrar peso en ducto para evitar contacto con paredes.
5. Soltar peso.
6. Evaluar el impacto sobre el alambre.
7. Si el alambre se corta, cambiarlo por el del siguiente diámetro y reiniciar pruebas; si el alambre no se corta, continuar con los siguientes pasos.
8. Cambiar alambre por uno nuevo.
9. Realizar pruebas con siguiente peso en lista.
10. Cuando se llega al último peso dentro de la categoría y el alambre no se corta, se repite el ensayo con el mismo peso hasta que haya discontinuidad en el cable, con un máximo de 10 ensayos (sin considerar el reemplazo del alambre por uno nuevo entre pruebas). No se sigue ensayando más allá de la prueba 10, ya que difícilmente el alambre se cortará.

En total se registraron 125 ensayos para los distintos diámetros de alambres, espesores de caucho y pesos de prueba, los cuales se pueden encontrar en *Anexos* a partir de la Tabla A.7.

4 | Análisis de Resultados

El fin de este capítulo es analizar los resultados de los puntos investigados en los capítulos anteriores e ir vislumbrando la realidad en cuanto al mantenimiento actual y explorar alternativas que en el tiempo mejoren este plan en base a datos reales y actualizados.

El uso del plan actual es básicamente tratar las ordenes de trabajo generadas automáticamente por sistema cercanas a la semana 32, y según el criterio del planificador, decidir qué ciclones intervenir. En base a estas 32 semanas reloj (y no de tiempo puro de operación) se compara el tiempo actual cumplido y en curso de los ciclones de la batería 1 en la Tabla A.25. De la muestra de ciclones que fueron cambiados últimamente según esta tabla, se aprecia que el 100 % de estos se hizo por sobre la semana 32, con un promedio de tiempo instalado de 51 semanas. Los ocho ciclones restantes por cambiar también superan el tope del plan y llevan instalados un promedio de 61 semanas. Evidentemente se tiene un plan por sistema alejado de la realidad desde el punto de vista de tiempo de instalación.

A continuación se analizan los resultados para las series generadas en base a los datos de granulometría provistos por los sensores *PST*, en busca de alguna relación existente con la vida útil del revestimiento del ciclón.

4.1. Análisis de la Serie Promedio Ciclón 10 Batería 2

El análisis de granulometría según la Serie Promedio de Datos generada para intervalos de una hora en ciclón 10 batería 2, se hace en base al gráfico de la Figura 4.1. Se observa que al haber aplicado las consideraciones de la Sección 3.3 ya no existen las rectas de puntos “perfectas” (positivas en su mayoría y algunas negativas) ni los valores menores a cero. Estas rectas, al ser de carácter bien definidas, pueden ser descalibraciones temporales en el *PST*, lo cual podría estar afectando directamente el material que se envía al circuito de flotación debido a que se le entrega información errónea al sistema *DCS*.

Se observan tendencias al alza entre agosto-septiembre 2017, noviembre-diciembre 2017 y mayo-julio 2018. El resto son tendencias a la baja en cuanto al tamaño de partícula, sobre todo en el periodo diciembre-mayo de ambos años. Dado que el gráfico de la serie promedio es una nube de puntos, es mejor analizar las tendencias en los gráficos para la serie de datos cruda y así confirmar una relación existente o no entre granulometría y desgaste (por ende una peor clasificación).

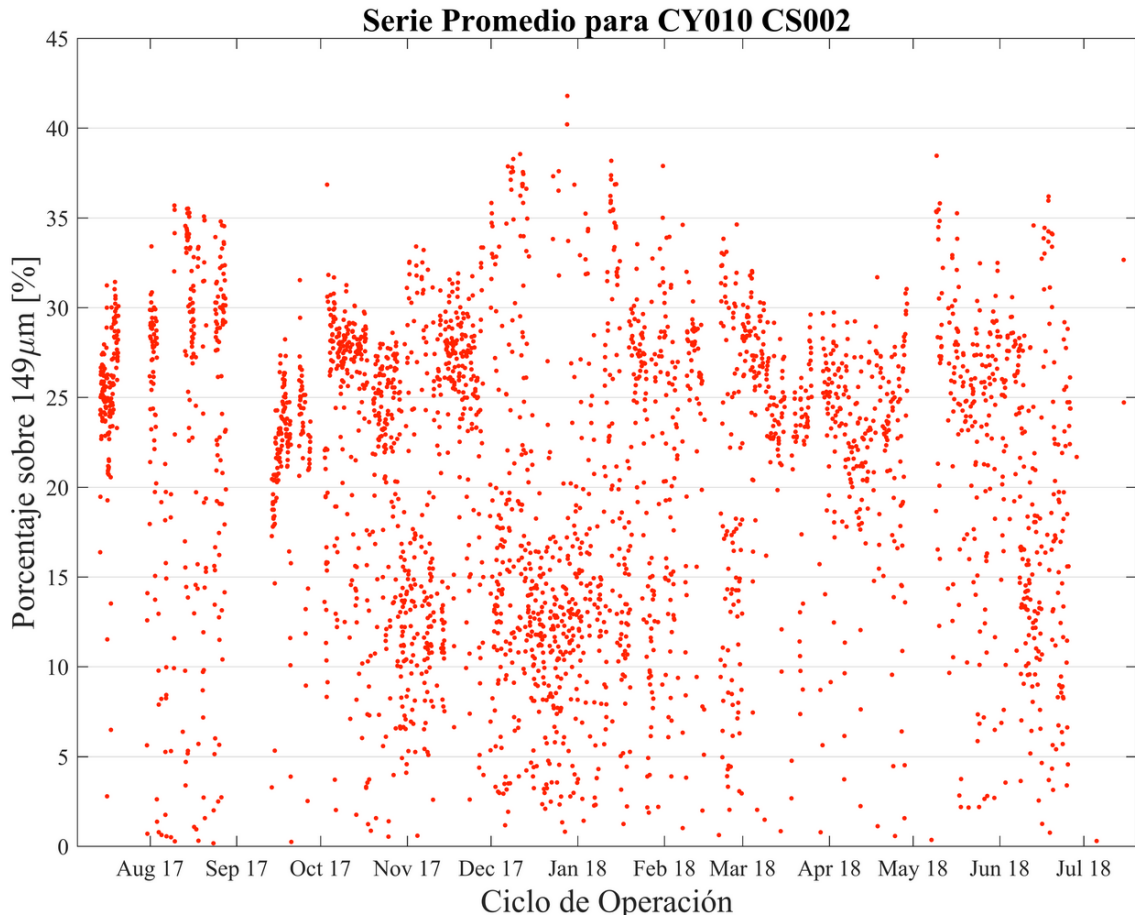


Figura 4.1: Gráfico de la Serie Promedio procesada del Ciclón 10 Batería 2.

4.2. Análisis de la Serie Cruda Ciclón 10 Batería 2

En los siguientes gráficos, se aprecia de mejor forma las tendencias en periodos mensuales en cuanto a la clasificación del ciclón según *PST*. A partir del análisis en cada uno de ellos, se buscará la relación existente o no entre granulometría de paso y calidad de clasificación, sabiendo que este ciclón en particular falló por rotura en su revestimiento. La tendencia esperada es que el tamaño de las partículas en porcentaje de granulometría que detecta el *PST* vaya aumentando en el tiempo para concluir así, que a medida que el desgaste aumenta, el ciclón clasifica peor.

A diferencia del gráfico anterior, esta serie muestra cada uno de los puntos medidos por el sensor, tomando en cuenta que al igual que la serie promedio, se le aplicaron filtros como los de eliminar los valores de las rectas marcadas, puntos donde la confianza del dato es menor a 100% y valores menores a cero. Además, a cada gráfico se le incorpora una línea de tendencia, para facilitar la búsqueda del aumento de granulometría en el tiempo.

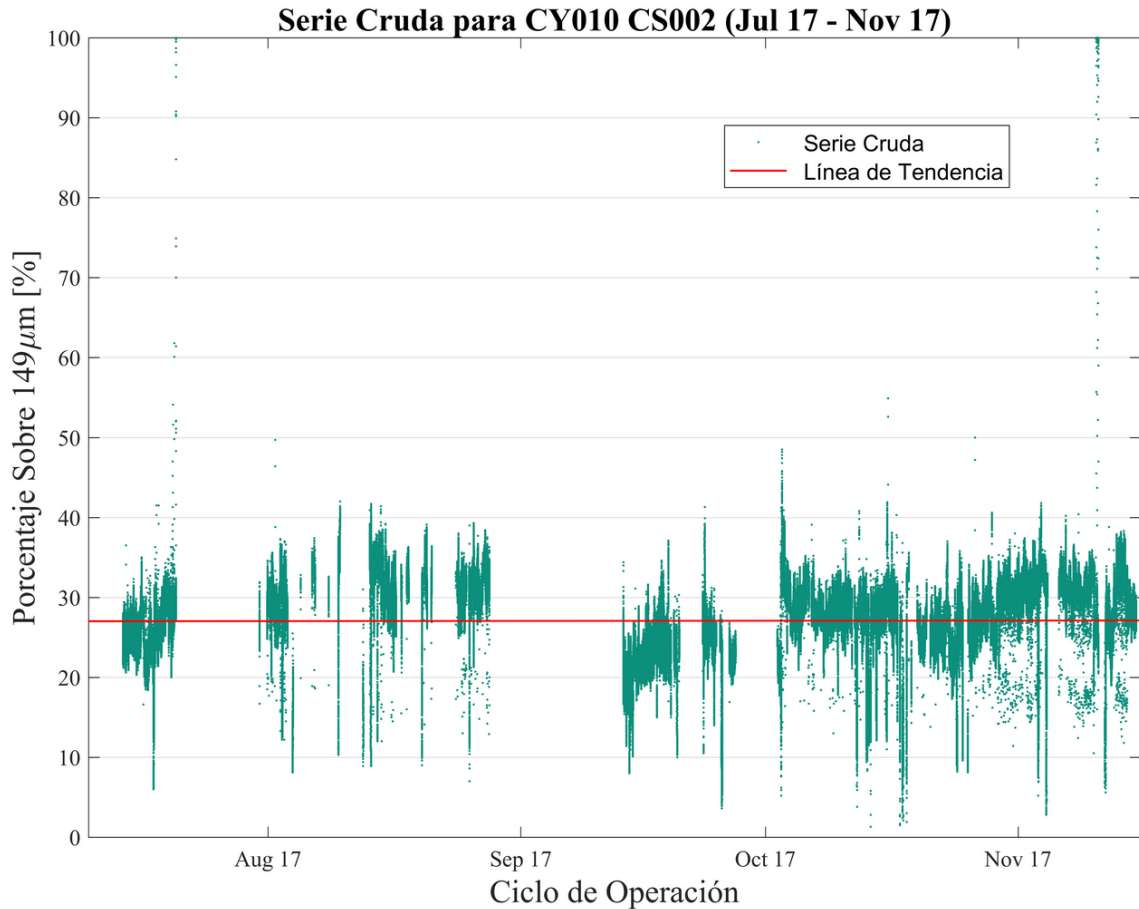


Figura 4.2: Gráfico de la Serie Cruda procesada del Ciclón 10 Bateria 2, para el periodo de julio y noviembre 2017.

Se puede observar lo siguiente:

- Entre julio y diciembre del 2017, existe una operación prácticamente pareja en cuanto a la clasificación del ciclón.
- Para este y los demás gráficos, las rectas perpendiculares al eje x se deben a los cortes en la válvula de alimentación al ciclón, lo que motiva más adelante a revisar la cantidad de cierres y aperturas de válvula mensuales.
- Los tramos en blanco se deben a que el ciclón no estuvo operando. Se detectan largos periodos de inactividad.
- En julio y noviembre se tienen mediciones que llegan al 100 % de partículas por sobre 149 micrómetros. Lo que puede significar un aumento brusco en el tamaño de corte del ciclón, lo que deriva en la orden de cerrar de inmediato la válvula de alimentación. Para que esta observación sea correcta, se debe contrastar la fecha y hora de estos *peaks* con las de otro ciclón de la misma batería, dado que debería haber ocurrido lo mismo en todos los ciclones.

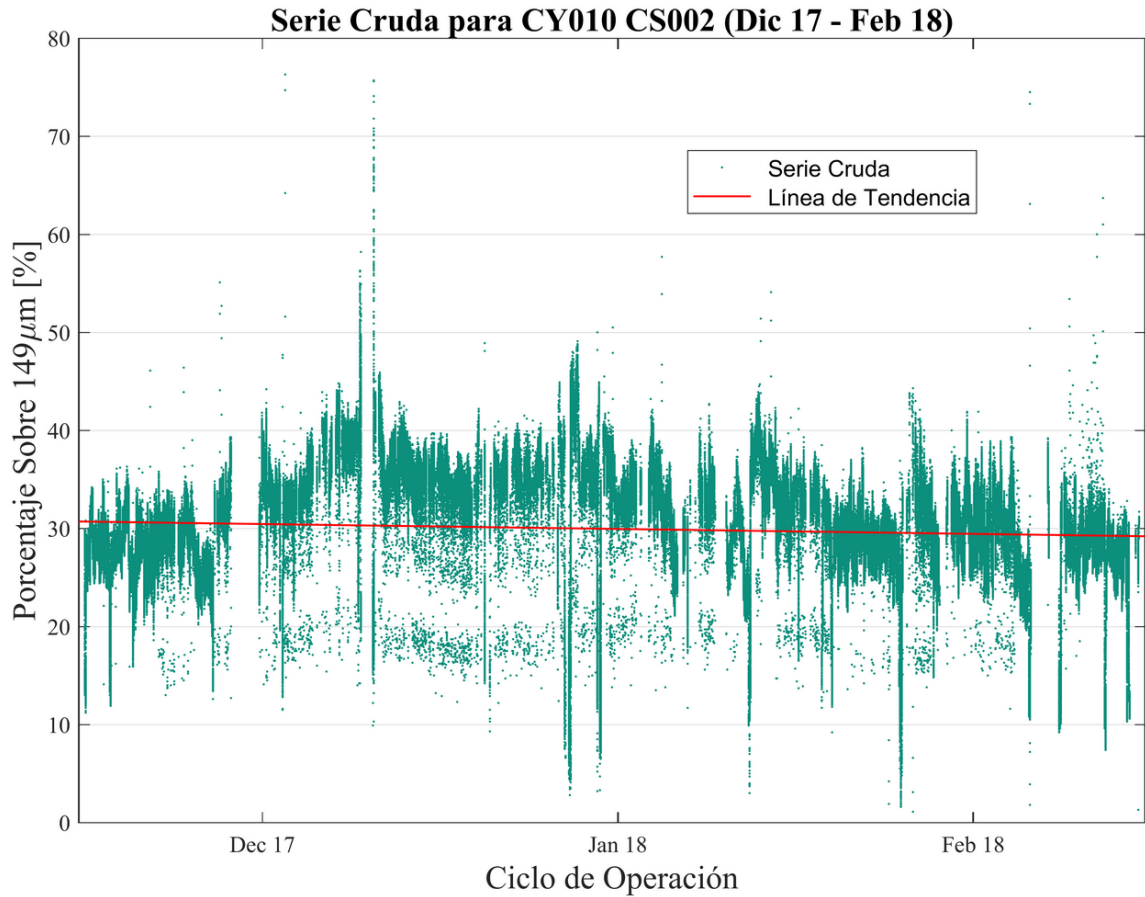


Figura 4.3: Gráfico de la Serie Cruda procesada del Ciclón 10 Batería 2, para el periodo de diciembre 2017 y febrero 2018.

De este gráfico se observan:

- Fluctuaciones en la granulometría que aumentan y disminuyen, las cuales derivan en una leve tendencia global a la baja (línea roja).
- En diciembre, una recta que tiende a llegar al 100 % de granulometría por sobre 149 micrómetros, justo en la apertura de la válvula, luego de que el ciclón estuvo fuera de operación unos días.
- Una dispersión mayor de puntos que en el resto de los gráficos.

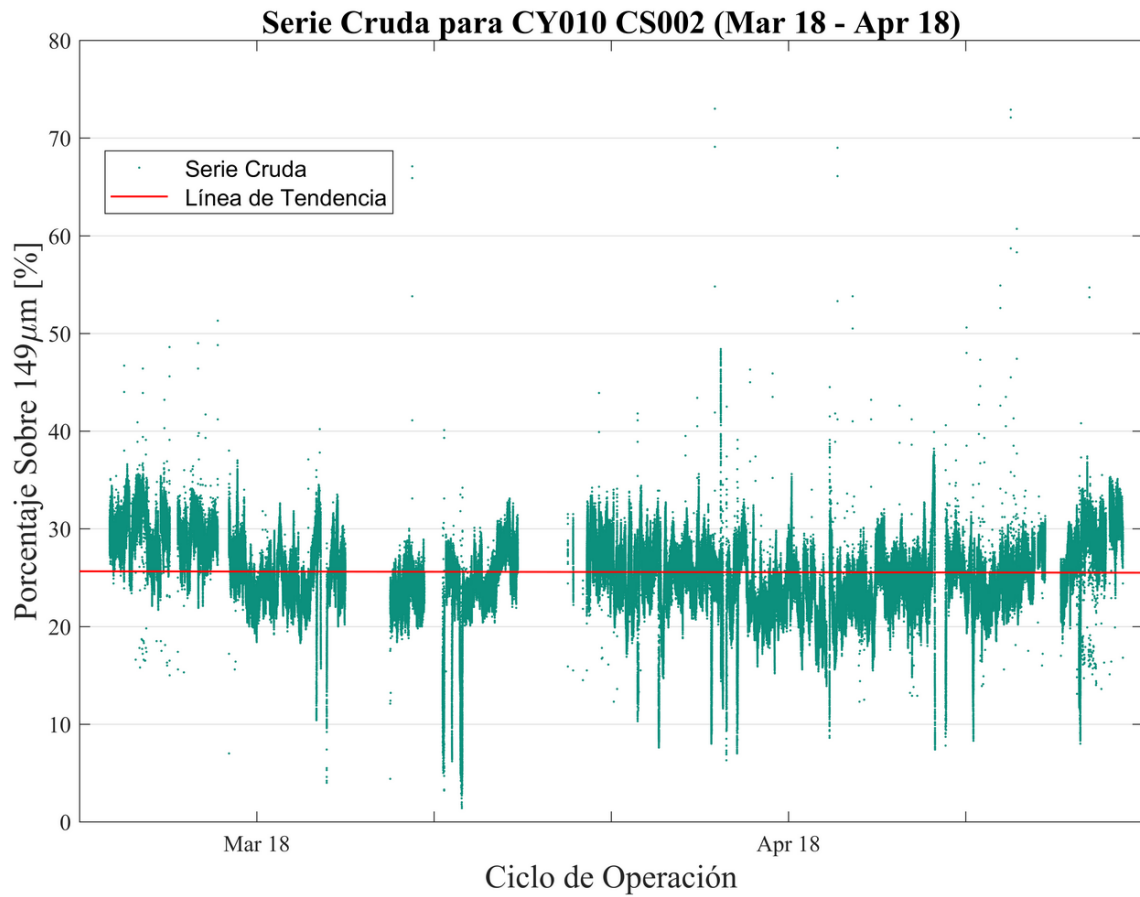


Figura 4.4: Gráfico de la Serie Cruda procesada del Ciclón 10 Bateria 2, para el periodo de marzo y abril 2018.

Con esta figura se tiene:

- Granulometría media constante en el tiempo (línea roja).
- Alza en los datos a partir de abril.
- Periodos de inactividad al igual que la Figura 4.2.

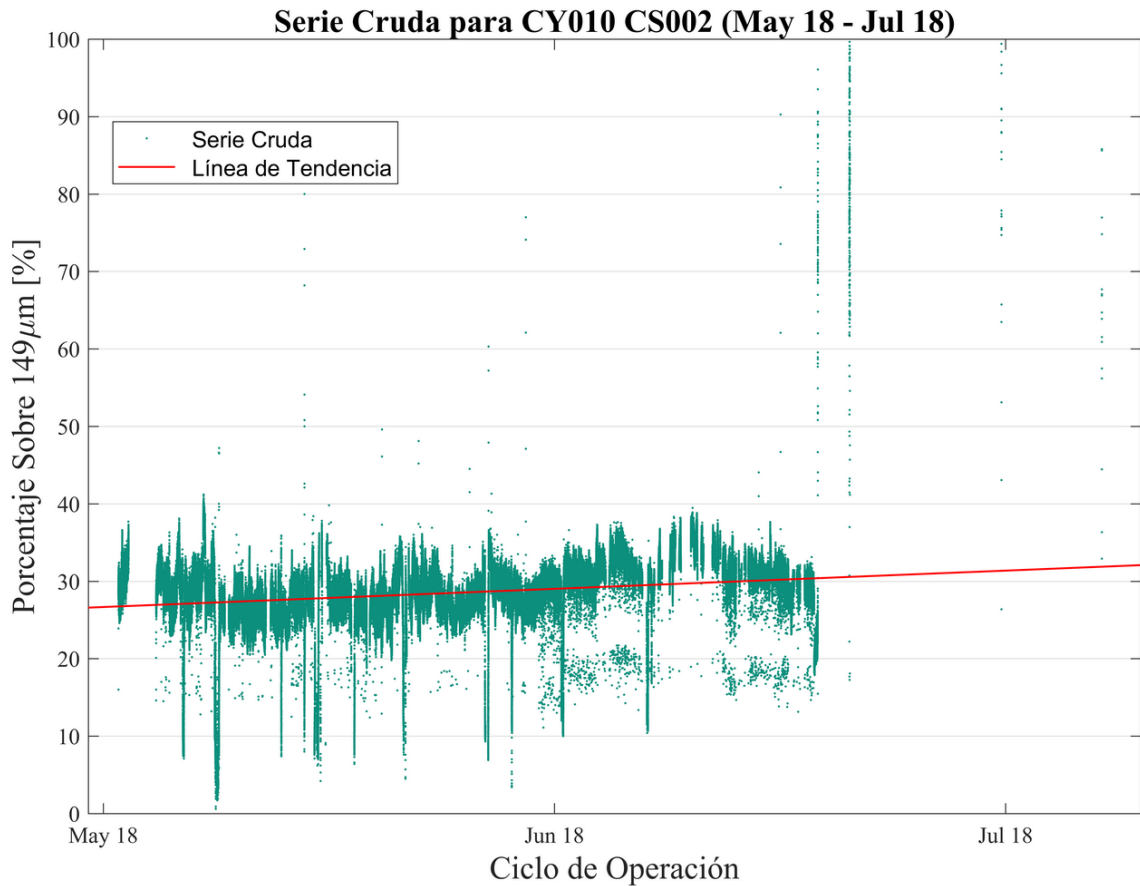


Figura 4.5: Gráfico de la Serie Cruda procesada del Ciclón 10 Bateria 2, para el periodo de mayo y julio 2018.

De este último periodo entre mayo y julio 2018 se observa:

- Tendencia ascendente en los últimos meses de operación del ciclón.
- Cuatro rectas perpendiculares consecutivas que tienden al valor 100 % al finalizar su ciclo de operación, las que podrían coincidir con cierre de válvula debido a la mala clasificación producto de la rotura encontrada cuando se retiró el ciclón.

En general y refiriéndonos a la Figura 4.6, los datos promedios del sensor *PST* son representativos en ciertas condiciones de la data instantánea (cruda), sin embargo, durante ciertos periodos de tiempo existen distorsiones de la media calculada, evidente entre noviembre 2017 - febrero 2018 y junio 2018. Acorde al análisis realizado, la media se ve alterada indicando valores no representativos de la realidad, al existir una alta frecuencia de aperturas y cierres de la válvula de alimentación. En el periodo de noviembre - febrero se llegó a registrar más de 2 000 aperturas y cierres de válvula, y en junio 2018 más de 700 (Tabla A.6). Algo importante que se detecta con los gráficos, es que las rectas ascendentes “perfectas” de la Figura 3.3 son generadas a partir de datos no reales, ya que al analizar la data cruda de las tablas se calcula el delta entre los registros que generan dichas rectas (visto en la Sección 3.2) obteniéndose valores constantes, lo que es totalmente inadecuado y fuera de la realidad.

Respecto al efecto buscado entre granulometría y desgaste, en los tres primeros gráficos no hay una relación directa y evidente con la que se pueda asegurar esto, ni para la serie cruda ni promedio. En el cuarto gráfico (Figura 4.5) se ve una tendencia al alza de la granulometría que coincide con que al final de la vida útil del ciclón, cada vez que se le da apertura a la válvula de alimentación, esta se cierra debido a un aumento hasta 100 % de granulometría por sobre 149 μm , lo que podría significar la rotura encontrada en el revestimiento al abrir el ciclón.

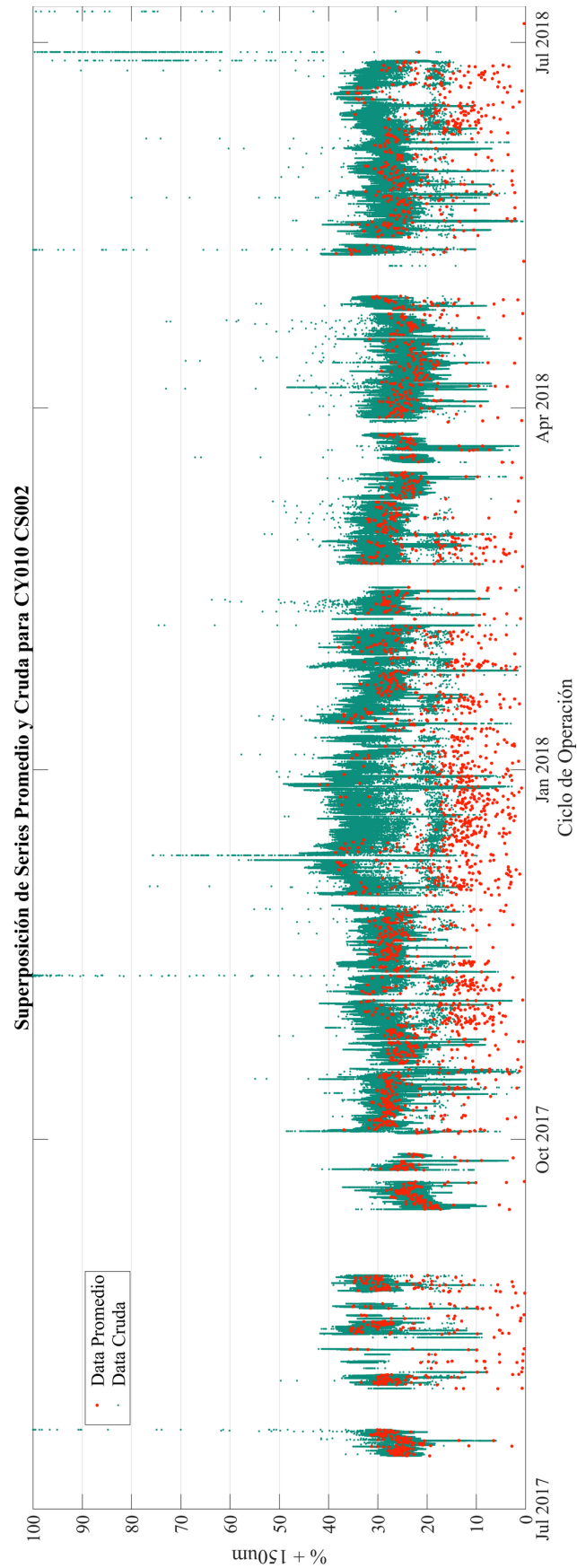


Figura 4.6: Gráfico de la Serie Promedio superpuesta en la Serie Cruda (ambas procesadas) del Ciclón 10 Batería 2.

Respecto a esto último se puede demostrar que el ciclón al estar terminando su ciclo de vida presenta un reiterado número de cierres y aperturas de la válvula de alimentación, donde coincide con que la clasificación empeora llegando hasta valores por sobre 90 %. En la Tabla 4.1 se compara el registro de granulometría del ciclón 10 con otros cuatro ciclones de la misma batería, para las mismas fechas y horas en tres instancias distintas, descartando que haya ocurrido el mismo registro del *PST* debido una distribución igualitaria de pulpa desde el manifold a todos los ciclones. Es importante conocer este antecedente ya que permite realizar un seguimiento de los cierres y aperturas cuando son recurrentes en un delta de tiempo y así poder tener otro tipo de alarma predictiva para modelar.

Tabla 4.1: Tabla que, para una misma fecha y hora, compara la granulometría registrada por el ciclón 10 batería 2 con otros cuatro ciclones de la misma batería.

Tag	26-06-2018 12:18:57	28-06-2018 14:43:37	28-06-2018 15:04:28
CY010 CS002	93,5	98,1	99,7
CY005 CS002	24,2	22,4	31,9
CY008 CS002	25,5	28,2	26,8
CY009 CS002	22,3	24,4	23,3
CY012 CS002	20,6	24,9	22,8

4.3. Análisis del Desgaste en Revestimientos

Con el horómetro propuesto en la Subsección 3.5.1 en base a los datos procesados en Sección 3.3 para el ciclón 10 batería 2, se evidencia la diferencia que existe entre un enfoque operacional (utilizando horómetro) y un enfoque en base al tiempo de instalación (32 semanas desde fecha de instalación del ciclón) (ver Tabla 4.2 y Figura 4.7). Esta diferencia es de alrededor un 50 %, tanto para el desgaste como para el tiempo. Un plan de mantenimiento por horómetros en sistema es más acotado a la realidad que tener uno que considere solamente el tiempo de instalación donde el planificador no podrá saber si el ciclón fallará. Además, se podrán realizar mejores seguimientos y análisis de tendencias.

Tabla 4.2: Tabla con tasas de desgaste para el ciclón 10 de batería 2, considerando el enfoque de tiempo de instalación y enfoque de tiempo de operación según horómetro propuesto en Sección 3.5.

Tag	Desgaste Promedio [mm]	Tiempo Instalación [horas]	Tiempo Operación [horas]	Diferencia	Tasa Desgaste (Instalación) [mm/hora]	Tasa Desgaste (Operación) [mm/hora]
CY010 CS002	39,49	8 904	4 469	49,81 %	0,0044	0,0088

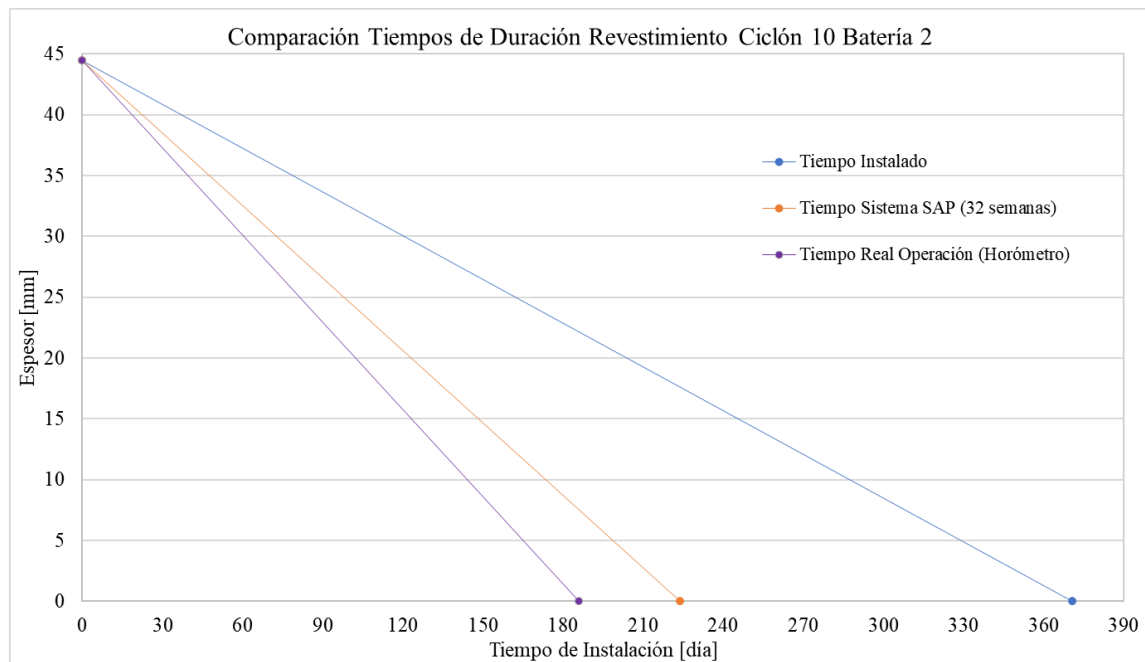


Figura 4.7: Gráfico comparativo de la duración del revestimiento según el enfoque de tiempo.

A partir de la metodología de mediciones aplicada en la Sección 3.6, se obtiene, en primer lugar, la Figura 4.8 que muestra los puntos de mediciones hechos al espesor del caucho en función del tiempo de instalación, para algunos puntos de la batería 1 y el 10 de la batería 2. Respecto a este gráfico, se encuentra una diferencia de alrededor 50 días entre el ciclón 10 y 14, pudiendo este último tener una mayor vida de operación. Ocurre lo mismo para el ciclón 16, donde aún teniendo casi 15 milímetros de espesor en el punto más crítico, se tiene la Tabla 4.3, donde se muestran los tiempos de instalación y el desgaste promedio obtenido para los ciclones de la batería 1, valor equivalente a un desgaste diario de 0,0045[mm/h], valor similar al del ciclón 10 batería 2 (enfoque de instalación) de la Tabla 4.2.

Para ambos casos vistos, los valores de desgaste por hora están directamente relacionados a los días instalados, por lo que su uso como criterio de desgaste no es preciso, comparado con el de llevar un control del desgaste relacionado a un horómetro de operación efectiva.

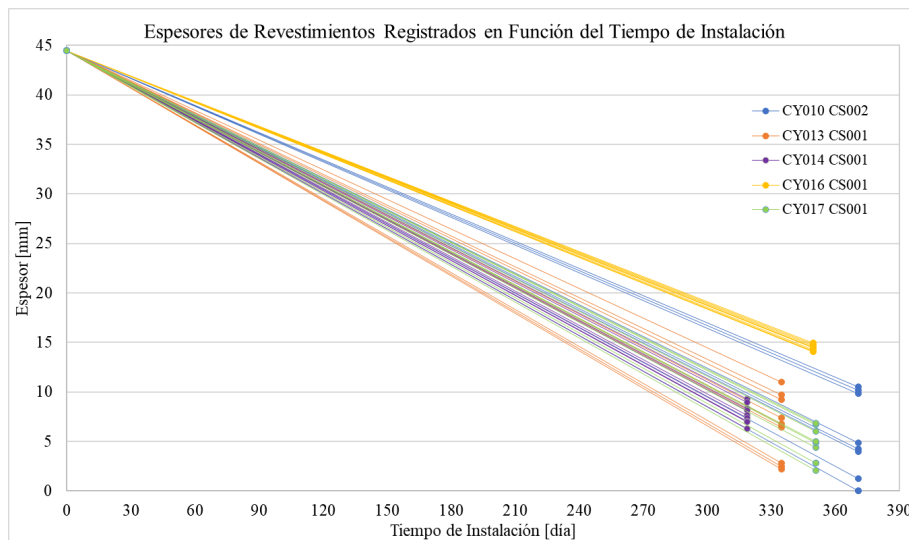


Figura 4.8: Gráfico con los registros de espesores finales medidos en revestimiento en función del tiempo de instalación.

Tabla 4.3: Tabla con tasas de desgaste considerando el tiempo de instalación de ciclones de Batería 1.

Tag Equipo	Tiempo Instalado [día]	Desgaste Promedio [mm]	Tasa Desgaste [mm/día]	Tasa Desgaste [mm/hora]
CY013 CS001	335	38,052	0,11	0,0047
CY014 CS001	319	36,690	0,12	0,0048
CY016 CS001	350	30,030	0,09	0,0036
CY017 CS001	351	39,868	0,11	0,0047
TOTAL			0,11	0,0045

4.4. Análisis de la Confección de Horómetro

Con el uso de horómetros para los ciclones, es posible llevar una contabilización confiable del tiempo de operación de cada equipo y así poder implementar planes más adecuados a la realidad. Esto permitiría generar bases de datos para luego desarrollar o investigar otras variables de comportamiento y relacionarlas a estas horas de trabajo.

La propuesta #2 en la Subsección 3.5.2 es confiable porque está basada en estados operacionales y de funcionamiento de equipos asociados a las baterías de hidrociclones, estados que mediante una comprobación binaria garantiza una contabilización de tiempo real, cuando el ciclón esté verdaderamente procesando pulpa y no solo agua:

- Se verifica que el molino de bolas esté procesando la carga (*underflow*) de las baterías y no solo agua (por eso se solicita que la potencia mínima debe ser de 10 [MW]).
- La bomba de alimentación a las baterías debe estar impulsando pulpa desde el sumidero donde descarga el molino de bolas.
- El diagrama además cerciora que las válvulas estén abiertas mediante la comprobación del sensor interno de fin de carrera (se han encontrado válvulas con estos sensores invertidos).
- Por último se comprueba que el equipo no se encuentre en modo falla o modo mantenimiento (fuera de servicio).

Esta implementación es fácil y de bajo costo, ya que solo se requiere el conocimiento para programar la solicitud de data de sensores o tags de variables de operación, programar la contabilización según el diagrama de la Figura 3.5 y posteriormente la programación de la interfaz para mostrar los resultados. Una vez instaurados, deben tener un tag asociado a cada horómetro para así poder consultar información o utilizarlos para generar una base de datos.

4.5. Análisis de la Propuesta Tecnológica

A partir de la propuesta vista en la Sección 3.7 junto a sus ensayos de la Subsección 3.7.3 se tiene lo siguiente:

En los ensayos de la Categoría 1 (Figura 4.9, 4.10 y 4.11), se visualiza una tendencia esperada: a mayor diámetro y espesor del caucho, el alambre resiste un mayor número de impactos. Como en la prueba de los 4 000 gramos de la Figura 4.10, donde el mismo alambre (sin cambiarlo entre repeticiones de ensayo para la misma masa) con caucho de espesor 2 [mm] es capaz de soportar hasta ocho veces este peso. Aún más evidente, en la prueba de los 4 000 gramos para los tres diámetros de alambre con caucho de 10 [mm], todos los ensayos superaron el máximo de 10 impactos sin corte, por lo que el caucho es el factor más importante a la hora de conferirle mayor resistencia ante el impacto al alambre.

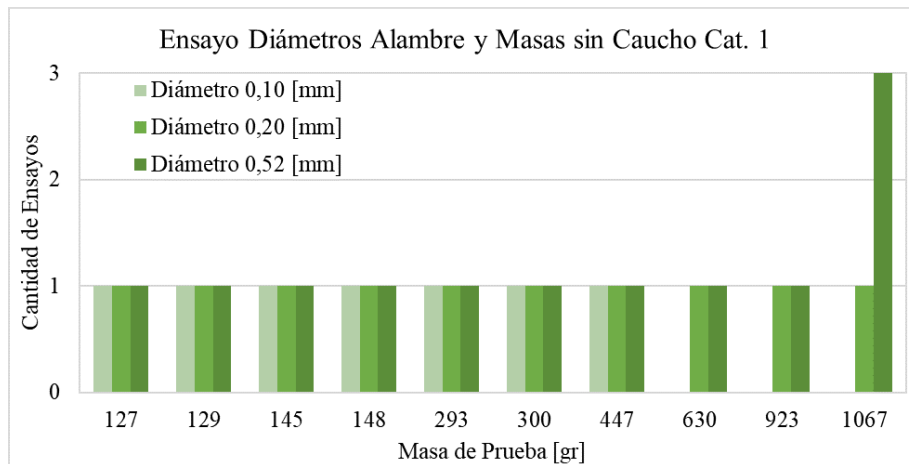


Figura 4.9: Categoría 1 de ensayos de impacto con masas sobre tres diámetros de alambre, sin caucho.

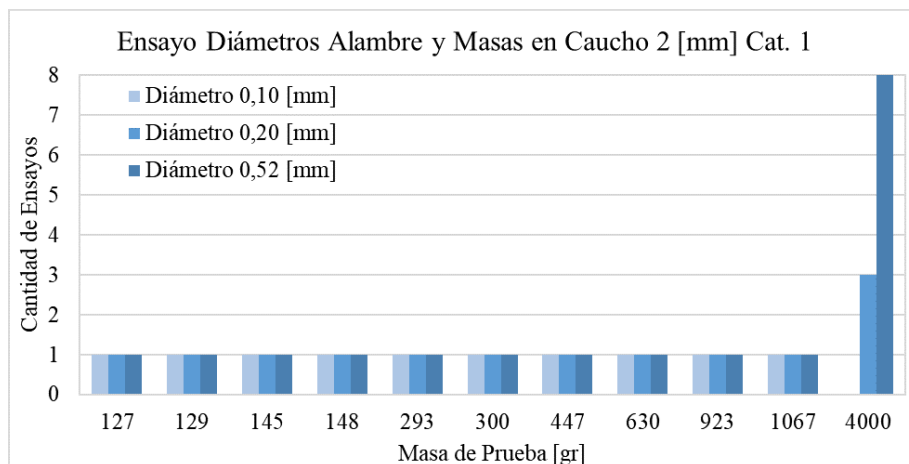


Figura 4.10: Categoría 1 de ensayos de impacto con masas sobre tres diámetros de alambre, con caucho de 2 [mm].

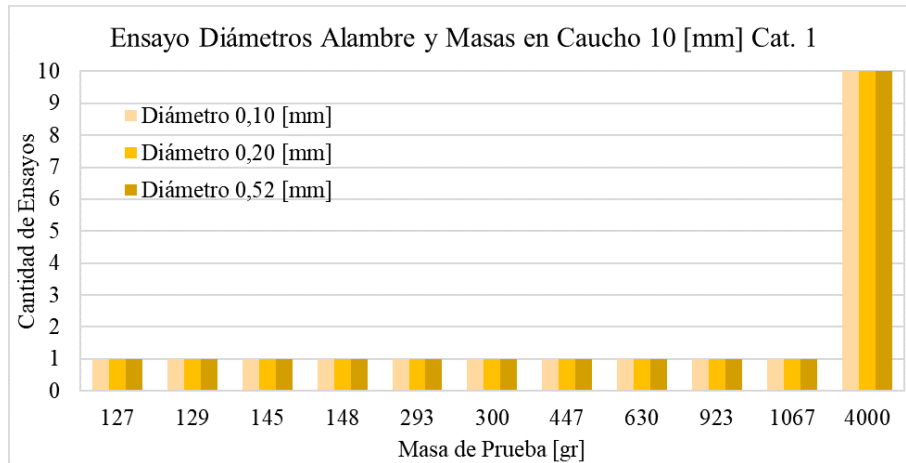


Figura 4.11: Categoría 1 de ensayos de impacto con masas sobre tres diámetros de alambre, con caucho de 10 [mm].

Para la Categoría 2 (Figura 4.12, 4.13 y 4.14) ocurre el mismo fenómeno, ante un mayor espesor de caucho y mayor diámetro de alambre, se tiene una mayor cantidad de pruebas sin corte.

Lo interesante de estos ensayos es la diferencia en cuanto a forma entre los pesos de ambas categorías. Se tiene que un peso con forma física no definida, como las rocas de la Categoría 1, presentan una mayor tendencia a cortar el cable, pudiendo ser por los bordes filosos o concentración de impacto en una área muy pequeña. En cambio, los pesos de la Categoría 2 son uniformes en cuanto a forma, por lo que el alambre tiende a soportar más pruebas para masas mayores.

En general, las pruebas demostraron que no es fácil cortar un alambre, sobretodo si este cuenta con una protección de goma. Considerar que el escenario de los ensayos es más desfavorable que la realidad, dado que el espesor nominal del caucho ronda los 45 milímetros comparado a los 2 o 10 utilizados, y que la rapidez de entrada del objeto, en condiciones normales de operación, es de alrededor 1,7 [m/s] comparada a los 7,9 [m/s] de referencia para los ensayos. Por último, se debe tener en cuenta que la entrada de pulpa y objetos al ciclón no ocurre en la zona que se propone el inserto de alambres, por lo que el impacto no será directamente perpendicular al revestimiento, si no que en ángulo y describiendo una trayectoria cilíndrica, apegada al revestimiento.

Finalmente la instalación en forma horizontal de un enmallado (idea original de la Subsección 3.7.1) o la de insertos de alambres (propuesta de la Subsección 3.7.2) se podría llevar a cabo sin exponer al corte la totalidad de los alambres desde un inicio. Para el caso de la instalación propuesta para detectar los resaltes negativos, podría existir un corte prematuro de los cables que estarían dispuestos entre el borde del revestimiento anterior con el borde del revestimiento siguiente (alambres más gruesos de la Figura 3.12) debido al desgaste por abrasión de la pulpa. De todas formas, esta propuesta seguirá representando una buena medición del desgaste ya que el alambre que estará dispuesto desde el borde del caucho siguiente hacia la carcasa (alambre más delgado de la Figura 3.12), según los ensayos hechos, no se cortará prematuramente por los golpes de objetos no comunes que ingresen al ciclón y sí por el desgaste, nuevamente, de la pulpa debido a la abrasión.

Ideas posteriores a su implementación, son conectar los insertos a una plataforma *open-source* (como *Arduino*) o a un microcomputador (como *Raspberry Pi*) para monitorear remotamente el estado del alambre e ir formando bases de dato, para luego relacionarlas a los horómetros del ciclón, a la granulometría o a la mineralogía de entrada a la planta. Esto con el fin de poder predecir fallas prematuras o crear un modelo más preciso para el desgaste del revestimiento a futuro.

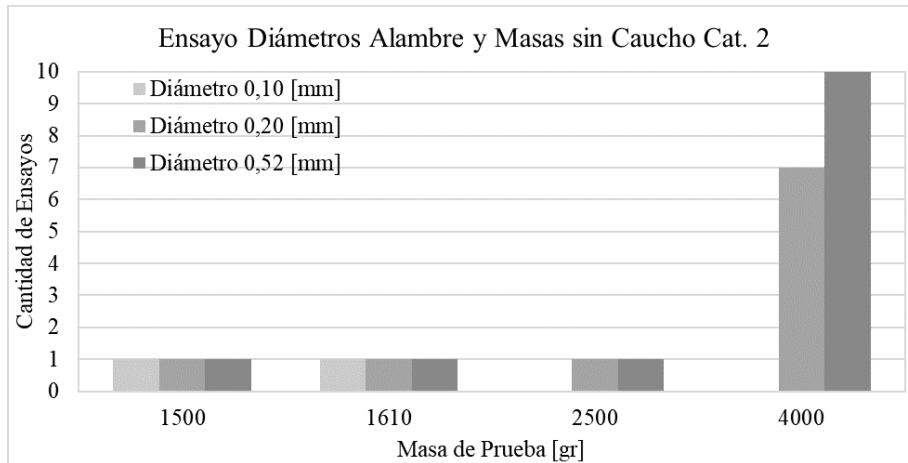


Figura 4.12: Categoría 2 de ensayos de impacto con masas sobre tres diámetros de alambre, sin caucho.

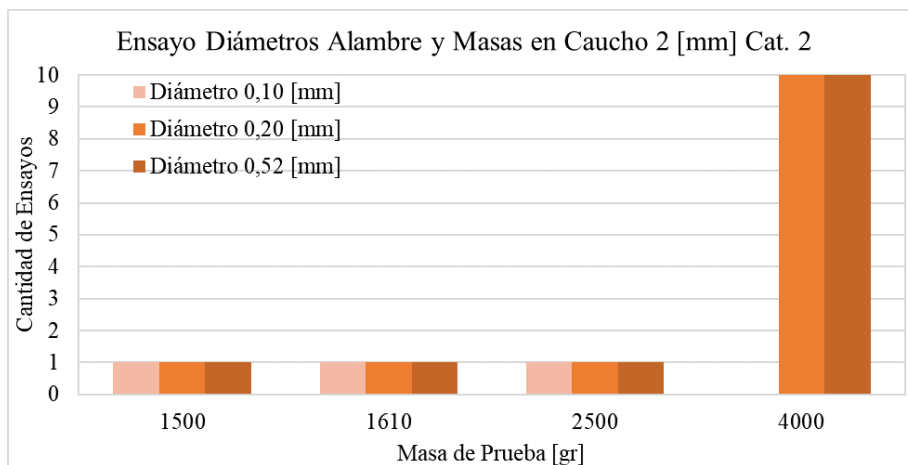


Figura 4.13: Categoría 2 de ensayos de impacto con masas sobre tres diámetros de alambre, con caucho de 2 [mm].

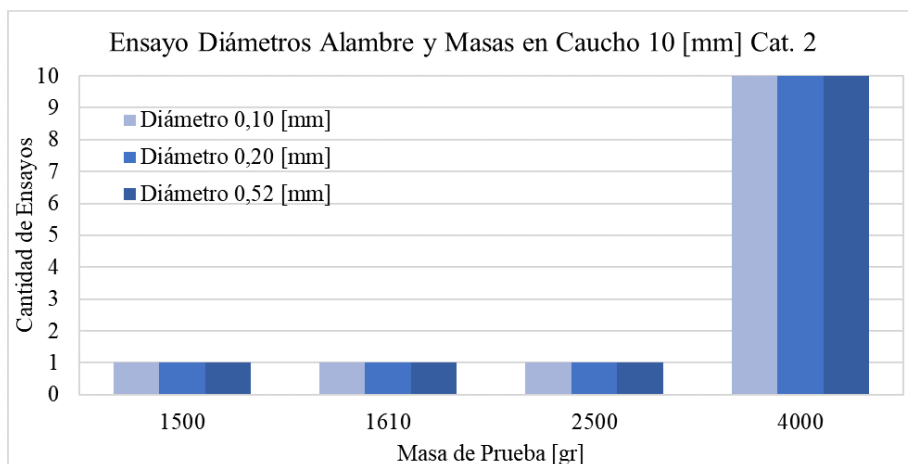


Figura 4.14: Categoría 2 de ensayos de impacto con masas sobre tres diámetros de alambre, con caucho de 10 [mm].

5 | Conclusiones

Con el fin de maximizar los resultados operacionales y económicos de Concentradora Laguna Seca, a través de la mejora del plan de mantenimiento y propuesta tecnológica para las baterías de hidrociclones, se demuestra por medio de los análisis de resultados que es posible generar un plan más preciso y confiable que el existente para los hidrociclones, con el solo hecho de analizar la data operacional histórica de los ciclones y contrastarla con lo encontrado en terreno.

Una de las alternativas es que el área de planificación adopte un plan de cambio de ciclones basado únicamente en el tiempo de instalación, que son las semanas transcurridas desde las posturas del equipo hasta su propio cambio. Este número no debiese sobrepasar la frecuencia de las 45 semanas en base al ciclón más desfavorable considerando que es de la batería #1 que tiene mayor *runtime* (visto al comienzo del Capítulo 4 y Sección 4.3), tiempo que se podrá ir calibrando dependiendo del estado en que se encuentre el ciclón al momento de reemplazarlo. Se debe tener en cuenta que cada vez ocurrido un cambio de ciclón, el planificador debe llevar una planilla con las fechas de esto para así saber cuándo llegará a la semana límite de planificación del mantenimiento. Disminuir la frecuencia de 32 a 45 semanas permite operar el ciclón por más tiempo, lo que se traduce en uso más beneficioso de los espesores remanentes que normalmente quedan por cambiar el equipo anticipadamente.

La segunda alternativa que nace del análisis de la data operacional, es la implementación de horómetros (Sección 4.4). Al realizar la comparación entre los tiempos de la alternativa anterior (contabilización de semanas de instalación) y esta en la Sección 4.3, se tiene que el seguimiento por tiempo de operación es más adecuado a la realidad considerando una tasa de desgaste diaria de 0,11 [mm/día], ya que el ciclón se cambiaría al final de su vida. Esto permite llevar un registro claro que posibilita la generación de un plan de mantenimiento mejorado, con la oportunidad de que luego de una serie de cambios de equipos e iteraciones, estos valores se puedan ir ajustando. La implementación de un horómetro que además contabilice el tonelaje efectivo procesado, permitirá llevar un registro con el que se podrá comparar rendimientos individuales (ciclón a ciclón) en cuanto a duración del revestimiento, como por ejemplo, llevar un seguimiento cuando se reemplace el caucho por otro material en alguno de los cuerpos en la parte cónica y analizar su desempeño.

Se demuestra en la Sección 3.6 que para establecer una tasa de desgaste del revestimiento, que sea adecuada y rastreada en base a la operación de los ciclones, es necesario tener la contabilización de horas de operación y no de las horas que llevan instalado, lo que motiva una vez más a insistir en el uso de horómetros. Respecto a la tasa obtenida en este estudio se debe utilizar como referencia para predecir la falla de un ciclón. Nuevamente esto permite ir preparando una planificación del cambio del equipo que podría irse ajustando mediante iteraciones, revisando si efectivamente el revestimiento se desgastó a la tasa declarada una vez que haya sido retirado, inspeccionado y medido.

Respecto a la búsqueda de una relación entre la granulometría de paso y el desgaste en el revestimiento del ciclón, esta no se encuentra directamente con la primera metodología aplicada a la base de datos del PST. Se detectaron irregularidades en los registros que no permitieron confirmar al 100 % una tendencia clara en el tiempo. Posteriormente se trató la serie, eliminando los datos que entorpecían un mejor análisis de la situación (Sección 3.4 y Sección 3.3) y, si bien se obtuvo un gráfico más limpio (comparativa del antes y después en Figura 4.6), derechamente no se visualiza lo esperado, ya que los puntos registrados se mantienen en constante fluctuación y no muestran tendencias que permitan confirmar una relación de que a medida que pasa el tiempo, el porcentaje de granulometría por sobre el P_{80} fuese aumentando debido a una clasificación menos eficiente por el desgaste progresivo del revestimiento. Lo que si se pudo apreciar y asegurar, es que la cantidad de cierres y aperturas de la válvula de alimentación aumenta considerablemente cuando se rompe el revestimiento, por lo que se podría llevar un monitoreo de estos registros en los otros ciclones para generar una nueva alarma de control y declarar embancamiento, rotura o desprendimiento del caucho, sin necesidad de primero planificar una inspección.

El análisis de los ensayos (Subsección 3.7.3) para llevar adelante la implementación de la propuesta tecnológica de este estudio es importante: las pruebas aseguran que instalar insertos de alambres para ir indicando el nivel de desgaste del revestimiento y detectar resaltes negativos, es posible. Esto debido a que las condiciones reales en el hidrociclón comparadas con las aplicadas en los ensayos de impacto, son mejores. En las pruebas se usaron condiciones desfavorables, como alambres desnudos y golpes directos de objetos irregulares, donde aún así el cableado resistió. Cabe mencionar que la instauración de este inserto es de carácter no destructivo, por lo que no afectará la clasificación de pulpa.

Su implementación permite predecir la zona crítica de generación de resaltes negativos y la profundidad de desgaste en el empalme del revestimiento, problema clave que afecta la operación de clasificar. Una solución de estas características es simple y de muy bajo costo, permitiendo planificar anticipadamente el mantenimiento de los ciclones que vayan a fallar por formación de resaltes o por la detección de desgaste acelerado por uso continuo del equipo (detectando un no cumplimiento de la filosofía de operación). Sería ideal el cambiar de caucho a revestimiento cerámico junto a la instalación de insertos, para llevar un seguimiento del desgaste y luego comparar el desempeño de ambos materiales.

Actualmente las fallas imprevistas por revestimiento afectan el plan semanal de mantenimiento, teniendo que dejar de lado otros trabajos para poder garantizar la disponibilidad de un mínimo 12 ciclones. Se han dado situaciones en la que teniendo no más de 12 disponibles operando, se han embancado hasta dos, lo que genera una restricción inmediata del tonelaje procesado por el molino de bolas asociado. La idea es que la planificación de la mantención a las baterías mejore con estas soluciones y las fallas imprevistas se puedan controlar de mejor manera, para así tener siempre una alta disponibilidad de ciclones operando y en modo *stand-by*.

En resumen:

- Si se sigue un plan en base al tiempo instalado del equipo, llevar la frecuencia de cambio para cada ciclón por separado a 45 semanas.
- Se debe llevar a cabo la programación e implementación del horómetro #2 propuesto en este trabajo para contabilizar las horas de operación de todos los ciclones.
- Para la metodología seguida en este estudio, no se encuentra una relación entre la granulometría de paso en el ciclón y el desgaste de su revestimiento; sí la relación entre gran cantidad de aperturas y cierres seguidos cuando el ciclón clasifica mal producto de un revestimiento roto, soplado u obstrucción del *apex*.
- El estudio del desgaste en el revestimiento requiere conocer las horas de operación efectivas (horómetro #2) e ir iterando con los espesores encontrados en ciclones retirados.
- Es posible implementar el inserto de alambres entre empalme de revestimientos para poder predecir la formación de resaltes negativos y llevar un registro del desgaste del revestimiento.

La modificación y actualización de un plan de mantenimiento es necesaria y debe ser progresiva en el tiempo, a la vanguardia de las investigaciones y tecnologías. Lo propuesto en este trabajo son herramientas simples, que cumplen con los requerimientos de la operación y además dan la posibilidad de relacionar sus resultados o registros con otras variables operacionales para disponer de más data para futuras mejoras, como poder entrelazar datos de dureza del mineral con la que se alimenta a los molinos (*SAG Power Index* o *Work Index*) y así mostrar una tasa de desgaste en el revestimiento por hora dependiendo de la dureza del material. Este tipo de desarrollos debe seguir perfeccionándose para fortalecer el mantenimiento de los equipos e ir convirtiendo la minería de hoy, en una operación más segura, eficiente y sustentable.

Bibliografía

- Asomah, AK y Napier-Munn, TJ (1997). An empirical model of hydrocyclones incorporating angle of cyclone inclination. *Minerals Engineering*, 10(3), 339–347. 2.2.3
- Bechtel (2012). *Criterio de Diseño para Filosofía de Operación - OGPI*. Bechtel Chile Ltda. Organic Growth Project 1; Job N° 25713-220-3DR-V01-00002. Rev.0. 2.5, 2.6, 2.7, 2.8
- BHP (2018). Bhp annual report 2018. Online. <https://www.bhp.com/investor-centre/annual-report-2018>. 2.3.1
- BNamericas (2015). Minera escondida: el mayor productor de cobre del mundo. Online. <http://www.bnamericas.com/es/noticias/mineria/minera-escondida-el-mayor-productor-de-cobre-del-mundo>. 1.1
- Bradley, Douglas (1965). *The Hydrocyclone - A Volume in International Series of Monographs in Chemical Engineering*. Pergamont, 1era edición. 2.2.3
- Bretney, Eugene (1891). Water purifier. US Patent No. 453,105A. 2.2
- Cidra® (2018a). *CYCLONEtrac™ PST - Sistema de Rastreo de Tamaño de Partículas*. Hoja de Datos, BI0509-sp Rev. R. 2.4.2.3
- Cidra® (2018b). Cyclonetrac™ pst 3d animation. <https://www.cidra.com/cidra-products/cyclonetrac-pst/3d-animation> [Online]. Acceso: Noviembre de 2018. 2.20
- Cochilco (2006). Procesamiento de minerales sulfurados. [Online]. Proyecto Educación y Minería, Comisión Chilena del Cobre. <https://es.slideshare.net/javimelo/procesamiento-cobre>. 2.1
- Drzymala, Jan (2007). *Mineral Processing, Foundations of theory and practice of metallurgy*. Wroclaw University of Technology, primera edición. 2.1
- Güenechea, Lexuri (2016). Caracterización de microhidrociclones. Trabajo Fin de Grado Ingeniería Química. Leioa, Bizkaia, España: Zientzia eta Teknologia Fakultatea, Euskal Herriko Unibertsitatea. 42p. 2.2.2
- González Carrasco, Luis (2018). Dos lecciones de la minería chilena para incrementar la productividad en América latina. *chicago policy review*. Online. <http://www.chicagopolicyreview.org/2018/02/15/dos-lecciones-de-la-mineria-chilena-para-incrementar-la-productividad-en-america-latina>. 1.1
- ICA (2017). El impacto de la minería del cobre en Chile, international copper association. Online. <https://www.procobre.org/es/wp-content/uploads/sites/2/2018/04/ica-summary-document-el-impacto-de-la-mineria-del-cobre-en-chile-vf-04.04.2018.pdf>. 1.1
- ICSG (2018). IcsG world copper factbook 2018. Online. <https://www.icsg.org/index.php/component/jdownloads/finish/170/2876>. 2.3.1
- Meller, Patricio (1996). *Un siglo de economía política chilena (1890-1990)*. Editorial Andrés Bello,. 1.1

- Muñoz, Alex; Muñoz, Juan; y Jerez, Alonso (2017). *Instructivo Operacional - Parámetros Operacionales Concentradora Laguna Seca*. Minera Escondida. Rev.1. 2.3.3, 2.3.4, 3.5.2
- of Chemistry, Royal Society (2009). Rsc chemical methods ontology. Online. http://purl.obolibrary.org/obo/CHMO_0002119. 2.1.1
- Patra, Gayatree; Velpuri, Bhargava; Chakraborty, S; y Meikap, BC (2017). Performance evaluation of a hydrocyclone with a spiral rib for separation of particles. *Advanced Powder Technology*, 28(12), 3222–3232. 2.2
- Puprasert, C; Hebrard, G; Lopez, L; y Aurelle, Y (2004). Potential of using hydrocyclone and hydrocyclone equipped with grit pot as a pre-treatment in run-off water treatment. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(1), 67–83. 2.3, 2.4
- Rode, Hilmar (2015). Escondida, enhancing our competitive advantage. Online. https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/investors/reports/2015/151202_coppersitetourday2.pdf?la=en. 2.3.1
- Standard, A.S.T.M. (2017). *E11-17, Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. 2.4.2.3

A | Tablas

Tabla A.1: Consolidado de fallas comunes detectadas en inspecciones a baterías de ciclones entre el 11-03-18 al 26-08-18.

Batería	11-03-18			03-06-18			01-07-18			15-07-18			29-07-18			12-08-18			26-08-18			TOTAL
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
Embancado										1	7	1		1	1		2				15	
Aire Cortado	3		4	2																	9	
Mala Clasificación	2					1						1					1	1			7	
Otros					1						1	2	1			1			1		8	
Válvula Trabada	1									1			2	1	1					1	7	
Apex Roto	1	1										2					1				5	
Splash Roto	1	1					1							1							4	
Válvula Filtrando	1			1				1													3	
Fisura Cono Superior	1																				2	
Fisura Cono Intermedio																					1	
Vórtex Roto																	1				1	

Tabla A.2: Tabla representativa de la serie de datos promedio generada para Ciclón 10 Batería 2.

Timestamp	ELS.310-AIT-002-C10.PV - Average	ELS.310-AIT-002-C10.PV - Average - Confidence
14-07-2017 5:00:00	16,373	100
14-07-2017 6:00:00	19,464	100
⋮	⋮	⋮
15-07-2018 9:00:00	32,660	100
15-07-2018 10:00:00	24,715	100

Tabla A.3: Tabla representativa de la serie de datos generada para válvula de alimentación a Ciclón 10 Batería 2.

Timestamp	ELS.310-STAT-002-C10.PV - Raw	ELS.310-STAT-002-C10.PV - Raw - Confidence
04-07-2017 10:39:25	0	100
04-07-2017 10:43:45	1	100
⋮	⋮	⋮
15-07-2018 9:42:56	1	100
15-07-2018 9:44:32	0	100

Tabla A.4: Tabla representativa de la serie de datos cruda generada para el Ciclón 10 Batería 2.

Timestamp	ELS.310-AIT-002-C10.PV - Raw	ELS.310-AIT-002-C10.PV - Raw - Confidence
14-07-2017 5:41:12	23,700	100
14-07-2017 5:41:17	24,200	100
⋮	⋮	⋮
15-07-2018 9:43:52	44,450	100
15-07-2018 9:43:56	36,330	100

Tabla A.5: Tabla con el registro de los nueve puntos de medición de espesores hechos a revestimientos de ciclones.

Tag Equipo	Esp 1 [mm]	Esp 2 [mm]	Esp 3 [mm]	Esp 4 [mm]	Esp 5 [mm]	Esp 6 [mm]	Esp 7 [mm]	Esp 8 [mm]	Esp 9 [mm]
CY013 CS001	9,18	9,64	10,98	6,38	6,74	7,32	2,18	2,42	2,76
CY014 CS001	9,28	8,94	8,28	8,14	7,62	7,38	6,98	6,96	6,28
CY016 CS001	14,88	14,80	14,64	14,52	14,44	14,28	14,08	14,08	14,04
CY017 CS001	6,02	6,64	6,84	4,32	4,80	4,98	2,04	2,76	2,80
CY010 CS002	10,46	10,12	9,82	4,86	4,22	3,92	1,22	0,00	0,00

Tabla A.6: Tabla con la cantidad de aperturas y cierres por año y mes de la válvula de alimentación del Ciclón 10, Batería 2.

Año	Mes	Aperturas y Cierres
2017	Julio	15
2017	Agosto	159
2017	Septiembre	13
2017	Octubre	264
2017	Noviembre	490
2017	Diciembre	1 112
2018	Enero	627
2018	Febrero	349
2018	Marzo	66
2018	Abril	111
2018	Mayo	216
2018	Junio	760
2018	Julio	6
TOTAL		4 188

Tabla A.7: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,10 milímetros, sin capa de caucho.

Ensayos Categoría 1: Alambre Ø 0,10 [mm]; Altura 3,20 [m]; Sin caucho				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
1.1	1	127	sin corte	1
1.2	2	129	sin corte	1
1.3	3	145	sin corte	1
1.4	4	148	sin corte	1
1.5	5	293	sin corte	1
1.6	6	300	sin corte	1
1.7	7	447	corte	1

Tabla A.8: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,20 milímetros, sin capa de caucho.

Ensayos Categoría 1: Alambre Ø 0,20 [mm]; Altura 3,20 [m]; Sin caucho				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
1.8	1	127	sin corte	1
1.9	2	129	sin corte	1
1.10	3	145	sin corte	1
1.11	4	148	sin corte	1
1.12	5	293	sin corte	1
1.13	6	300	sin corte	1
1.14	7	447	sin corte	1
1.15	8	630	sin corte	1
1.16	9	923	sin corte	1
1.17	10	1 067	corte	1

Tabla A.9: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,52 milímetros, sin capa de caucho.

Ensayos Categoría 1: Alambre Ø 0,52 [mm]; Altura 3,20 [m]; Sin caucho				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
1.18	1	127	sin corte	1
1.19	2	129	sin corte	1
1.20	3	145	sin corte	1
1.21	4	148	sin corte	1
1.22	5	293	sin corte	1
1.23	6	300	sin corte	1
1.24	7	447	sin corte	1
1.25	8	630	sin corte	1
1.26	9	923	sin corte	1
1.27	10	1 067	corte	3

Tabla A.10: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,10 milímetros, con capa de caucho de 2 milímetros.

Ensayos Categoría 1: Alambre Ø 0,10 [mm]; Altura 3,20 [m]; Caucho 2 [mm]				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
1.28	1	127	sin corte	1
1.29	2	129	sin corte	1
1.30	3	145	sin corte	1
1.31	4	148	sin corte	1
1.32	5	293	sin corte	1
1.33	6	300	sin corte	1
1.34	7	447	sin corte	1
1.35	8	630	sin corte	1
1.36	9	923	sin corte	1
1.37	10	1 067	corte	1

Tabla A.11: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,20 milímetros, con capa de caucho de 2 milímetros.

Ensayos Categoría 1: Alambre Ø 0,20 [mm]; Altura 3,20 [m]; Caucho 2 [mm]				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
1.38	1	127	sin corte	1
1.39	2	129	sin corte	1
1.40	3	145	sin corte	1
1.41	4	148	sin corte	1
1.42	5	293	sin corte	1
1.43	6	300	sin corte	1
1.44	7	447	sin corte	1
1.45	8	630	sin corte	1
1.46	9	923	sin corte	1
1.47	10	1 067	sin corte	1
1.48	11	4 000	corte	3

Tabla A.12: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,52 milímetros, con capa de caucho de 2 milímetros.

Ensayos Categoría 1: Cable Ø 0,52 [mm]; Altura 3,20 [m]; Caucho 2 [mm]				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
1.49	1	127	sin corte	1
1.50	2	129	sin corte	1
1.51	3	145	sin corte	1
1.52	4	148	sin corte	1
1.53	5	293	sin corte	1
1.54	6	300	sin corte	1
1.55	7	447	sin corte	1
1.56	8	630	sin corte	1
1.57	9	923	sin corte	1
1.58	10	1 067	sin corte	1
1.59	11	4 000	corte	8

Tabla A.13: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,10 milímetros, con capa de caucho de 10 milímetros.

Ensayos Categoría 1: Alambre Ø 0,10 [mm]; Altura 3,20 [m]; Caucho 10 [mm]				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
1.60	1	127	sin corte	1
1.61	2	129	sin corte	1
1.62	3	145	sin corte	1
1.63	4	148	sin corte	1
1.64	5	293	sin corte	1
1.65	6	300	sin corte	1
1.66	7	447	sin corte	1
1.67	8	630	sin corte	1
1.68	9	923	sin corte	1
1.69	10	1 067	sin corte	1
1.70	11	4 000	sin corte	10

Tabla A.14: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,20 milímetros, con capa de caucho de 10 milímetros.

Ensayos Categoría 1: Alambre Ø 0,20 [mm]; Altura 3,20 [m]; Caucho 10 [mm]				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
1.71	1	127	sin corte	1
1.72	2	129	sin corte	1
1.73	3	145	sin corte	1
1.74	4	148	sin corte	1
1.75	5	293	sin corte	1
1.76	6	300	sin corte	1
1.77	7	447	sin corte	1
1.78	8	630	sin corte	1
1.79	9	923	sin corte	1
1.80	10	1 067	sin corte	1
1.81	11	4 000	sin corte	10

Tabla A.15: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,52 milímetros, con capa de caucho de 10 milímetros.

Ensayos Categoría 1: Cable Ø 0,52 [mm]; Altura 3,20 [m]; Caucho 10 [mm]				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
1.82	1	127	sin corte	1
1.83	2	129	sin corte	1
1.84	3	145	sin corte	1
1.85	4	148	sin corte	1
1.86	5	293	sin corte	1
1.87	6	300	sin corte	1
1.88	7	447	sin corte	1
1.89	8	630	sin corte	1
1.90	9	923	sin corte	1
1.91	10	1 067	sin corte	1
1.92	11	4 000	sin corte	10

Tabla A.16: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,10 milímetros, sin capa de caucho.

Ensayos Categoría 2: Alambre Ø 0,10 [mm]; Altura 3,20 [m]; Sin caucho				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
2.1	12	1 500	sin corte	1
2.2	13	1 610	corte	1

Tabla A.17: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,20 milímetros, sin capa de caucho.

Ensayos Categoría 2: Alambre Ø 0,20 [mm]; Altura 3,20 [m]; Sin caucho				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
2.3	12	1 500	sin corte	1
2.4	13	1 610	sin corte	1
2.5	14	2 500	sin corte	1
2.6	15	4 000	corte	7

Tabla A.18: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,52 milímetros, sin capa de caucho.

Ensayos Categoría 2: Alambre Ø 0,52 [mm]; Altura 3,20 [m]; Sin caucho				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
2.7	12	1 500	sin corte	1
2.8	13	1 610	sin corte	1
2.9	14	2 500	sin corte	1
2.10	15	4 000	sin corte	10

Tabla A.19: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,10 milímetros, con capa de caucho de 2 milímetros.

Ensayos Categoría 1: Alambre Ø 0,10 [mm]; Altura 3,20 [m]; Caucho 2 [mm]				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
2.11	12	1 500	sin corte	1
2.12	13	1 610	sin corte	1
2.13	14	2 500	corte	1

Tabla A.20: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,20 milímetros, con capa de caucho de 2 milímetros.

Ensayos Categoría 2: Alambre Ø 0,20 [mm]; Altura 3,20 [m]; Caucho 2 [mm]				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
2.14	12	1 500	sin corte	1
2.15	13	1 610	sin corte	1
2.16	14	2 500	sin corte	1
2.17	15	4 000	sin corte	10

Tabla A.21: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,52 milímetros, con capa de caucho de 2 milímetros.

Ensayos Categoría 2: Cable Ø 0,52 [mm]; Altura 3,20 [m]; Caucho 2 [mm]				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
2.18	12	1 500	sin corte	1
2.19	13	1 610	sin corte	1
2.20	14	2 500	sin corte	1
2.21	15	4 000	sin corte	10

Tabla A.22: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,10 milímetros, con capa de caucho de 10 milímetros.

Ensayos Categoría 2: Alambre Ø 0,10 [mm]; Altura 3,20 [m]; Caucho 10 [mm]				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
2.22	12	1 500	sin corte	1
2.23	13	1 610	sin corte	1
2.24	14	2 500	sin corte	1
2.25	15	4 000	sin corte	10

Tabla A.23: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,20 milímetros, con capa de caucho de 10 milímetros.

Ensayos Categoría 2: Alambre Ø 0,20 [mm]; Altura 3,20 [m]; Caucho 10 [mm]				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
2.26	12	1 500	sin corte	1
2.27	13	1 610	sin corte	1
2.28	14	2 500	sin corte	1
2.29	15	4 000	sin corte	10

Tabla A.24: Ensayo de impactos sobre área con alambres de cobre de diámetro 0,52 milímetros, con capa de caucho de 10 milímetros.

Ensayos Categoría 2: Cable Ø 0,52 [mm]; Altura 3,20 [m]; Caucho 10 [mm]				
Id Ensayo	Id Peso	Masa [gr]	Resultado	Pruebas
2.30	12	1 500	sin corte	1
2.31	13	1 610	sin corte	1
2.32	14	2 500	sin corte	1
2.33	15	4 000	sin corte	10

Tabla A.25: Tabla con fechas de instalación y falla de ciclones de la Batería 1 al 04-11-2018.

Tag Equipo	Revestimiento	Fecha Instalación	Fecha Falla	Días Instalado	Semanas Instalado
CY001 CS001	Caucho	23-10-2017	Operativo	370	52
CY002 CS001	Cerámico	18-09-2017	07-09-2018	354	50
CY003 CS001	Caucho	23-10-2017	Operativo	370	52
CY004 CS001	Caucho	24-10-2017	Operativo	369	52
CY005 CS001	Caucho	09-08-2017	Operativo	445	63
CY006 CS001	Caucho	19-06-2017	Operativo	496	70
CY007 CS001	Caucho	19-06-2017	Operativo	496	70
CY008 CS001	Cerámico	17-09-2017	11-10-2018	389	55
CY009 CS001	Caucho	16-07-2017	Operativo	469	67
CY010 CS001	Caucho	21-06-2018	Operativo	129	18
CY011 CS001	Caucho	07-08-2017	29-10-2018	448	64
CY012 CS001	Caucho	26-10-2017	31-10-2018	370	52
CY013 CS001	Caucho	27-10-2017	27-09-2018	335	47
CY014 CS001	Caucho	27-11-2017	12-10-2018	319	45
CY015 CS001	Caucho	11-08-2017	Operativo	443	63
CY016 CS001	Caucho	31-10-2017	16-10-2018	350	50
CY017 CS001	Caucho	31-10-2017	17-10-2018	351	50
CY018 CS001	Caucho	14-04-2018	Operativo	197	28
CY019 CS001	Caucho	28-11-2017	02-11-2018	339	48