



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA

**ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE FILTROS CERÁMICOS PARA  
DISMINUIR Y OPTIMIZAR LA HUMEDAD DE CONCENTRADOS  
DE HIERRO EN PUERTO PUNTA TOTORALILLO**

Memoria presentada en conformidad a los requisitos para obtener el Título  
de Ingeniero Civil en Metalurgia

Florencio Ramiro Velásquez Campillay

Copiapó, Chile 2025.



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA

**ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE FILTROS CERÁMICOS PARA  
DISMINUIR Y OPTIMIZAR LA HUMEDAD DE CONCENTRADOS  
DE HIERRO EN PUERTO PUNTA TOTORALILLO**

Memoria presentada en conformidad a los requisitos para obtener el Título  
de Ingeniero Civil en Metalurgia

Profesor Guía: Mg. Juan Chamorro González

Tutor: Ing. Alfredo Rivera García

Ing. Marcela Saavedra Urizar

Comisión: Dr. Osvaldo Pavez Miqueles

Dra. Ana Rivera Varas

Florencio Ramiro Velásquez Campillay

Copiapó, Chile 2025.

# **ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE FILTROS CERÁMICOS PARA DISMINUIR Y OPTIMIZAR LA HUMEDAD DE CONCENTRADOS DE HIERRO EN PUERTO PUNTA TOTORALILLO**

Este documento de Trabajo de Titulación fue aprobado por:

<b>Nombre de la comisión</b>	<b>Calificación</b>	<b>Firma</b>
<b>Mg. Juan Chamorro González</b> Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	<b>7</b>	
<b>Dr. Osvaldo Pavez Miqueles</b> Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	<b>6.9</b>	
<b>Dra. Ana Rivera Varas</b> Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	<b>6.9</b>	

**Mg. Juan Chamorro González**

**Director Departamento de Ingeniería en Metalurgia**

## **DEDICATORIA**

*“A mi familia,  
por ser el pilar fundamental en cada etapa de este camino,  
por confiar siempre en que podía lograrlo,  
y por acompañarme con amor y paciencia incluso en los momentos más difíciles.*

*Con especial cariño, dedico esta memoria a mi abuelo Humberto Campillay,  
quien partió antes de poder ver este logro concretado,  
pero cuya presencia, enseñanzas y ejemplo me han acompañado siempre.  
Sé que, donde quiera que esté, se sentiría orgulloso del recorrido y del esfuerzo que me  
ha traído hasta aquí.*

*Gracias por todo.”*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al culminar esta etapa tan importante en mi vida, quiero dedicar unas palabras de gratitud a todas las personas que fueron parte fundamental de este proceso y que hicieron posible la realización de esta memoria.

En primer lugar, agradezco profundamente a mis padres, Ximena y Florencio, por su amor incondicional, por ser mi mayor fuente de apoyo y por enseñarme, con su ejemplo, el valor del esfuerzo y la perseverancia. Gracias también a mi querida abuela Edita, por su cariño, sabiduría y por estar siempre presente en mi vida con palabras de aliento y ejemplo de fortaleza.

Quiero rendir un especial homenaje a mi abuelo, Humberto Campillay, quien, a pesar de no estar físicamente, sigue siendo una guía fundamental en mi vida. Gran parte de lo que soy se lo debo a él, a sus enseñanzas, valores y al amor que siempre me entregó. Su recuerdo me ha acompañado durante todo este proceso y este logro también le pertenece.

Agradezco especialmente a la Compañía Minera del Pacífico (CMP) por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de desarrollar esta memoria en sus instalaciones. En particular, a Marcela Saavedra, mi tutora en CMP, por su constante acompañamiento, compromiso y por estar siempre atenta a cada avance, brindándome guía y confianza a lo largo de todo este proceso.

A mi profesor guía, Juan Chamorro, gracias por su dedicación y constancia, por exigirme avances semana a semana, por su valiosa guía académica, plantear sólidas bases para el trabajo y orientar cada etapa con claridad y paciencia. Su apoyo fue clave para el desarrollo de esta memoria.

A mis amigos Catalina, Kevin y Paula, gracias por su compañía, por compartir este camino y por hacer más llevaderos los momentos difíciles. A Catalina, en especial, gracias por haberte convertido en una gran amiga que atesoro profundamente. Tu amistad sincera, tu apoyo incondicional en los momentos más difíciles, tu compañía y generosidad fueron un verdadero refugio cuando más lo necesitaba. Haber recorrido este camino contigo y llegar casi juntos al final le da un sentido aún más especial a todo lo vivido.

Finalmente, gracias a todas las personas que de una u otra forma estuvieron presentes, alentando, acompañando y creyendo en mí. Este logro no habría sido posible sin ustedes.

## INDICE DE CONTENIDO

1	CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Antecedentes generales .....	1
1.2	Objetivos .....	5
1.2.1	Objetivo general.....	5
1.2.2	Objetivos específicos .....	5
1.3	Problemática.....	6
1.4	Motivación.....	6
1.5	Delimitaciones.....	6
2	CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	8
2.1	Descripción del Proceso .....	8
2.2	Filtración .....	9
2.2.1	Filtros de Presión – Filtro Prensa de Placas y Marcos.....	9
2.2.2	Filtros de Presión – Filtros de Hoja .....	11
2.2.3	Filtros Centrífugos .....	13
2.2.4	Filtros al Vacío – Filtros de Tambor Rotatorio.....	14
2.2.5	Filtros al Vacío – Filtros de Disco .....	16
2.2.6	Filtros al Vacío – Filtros de Banda Horizontal .....	17
2.2.7	Filtración Cerámica.....	18
2.3	Mecanismo de Filtración .....	20
2.4	Principios de Operación del Filtro Cerámico .....	21
2.4.1	Formación de Queque .....	21
2.4.2	Secado del Queque.....	22
2.4.3	Descarga del Queque .....	22
2.4.4	Retrolavado .....	22

2.4.5	Regeneración de Disco .....	22
2.5	Discos Outotec CC-144.....	23
2.6	Factores que Afectan la Filtración Cerámica.....	24
2.6.1	Potencial Zeta .....	24
2.6.2	Adición de Floculante.....	26
2.6.3	Distribución Granulométrica .....	27
2.6.4	Tiempo de Filtrado.....	28
2.6.5	Estado de Discos.....	29
2.7	Transductores .....	29
2.8	Modelamiento.....	30
3	CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA .....	32
3.1	Desarrollo Experimental.....	32
3.1.1	Objetivo de la prueba.....	32
3.1.2	Ubicación y condiciones operacionales.....	32
3.1.3	Procedimiento experimental .....	32
3.1.4	Equipos e instrumentos utilizados .....	34
3.1.5	Muestreo .....	34
3.2	Modelo Metalúrgico de Proceso.....	36
3.2.1	Definición del objetivo del modelo .....	36
3.2.2	Selección de variables significativas .....	36
3.2.3	Limpieza y validación de datos .....	37
3.2.4	Separación de datos de entrenamiento y prueba.....	37
3.2.5	Aplicación del modelo estadístico de regresión lineal múltiple .....	37
3.2.6	Evaluación del modelo.....	37
3.2.7	Implementación y validación del modelo final.....	37

4	CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	38
5	CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES .....	59
6	BIBLIOGRAFÍA .....	63
7	ANEXOS .....	67
7.1	ANEXO A .....	67
7.2	ANEXO B .....	68

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de proceso Puerto Punta Totoralillo.....	9
Figura 2.2 Esquema filtro prensa de placas.....	10
Figura 2.3 Filtro de presión de hojas.....	12
Figura 2.4 Decantador centrífugo. ....	13
Figura 2.5 Diseño típico de filtro de tambor rotatorio. ....	15
Figura 2.6 Esquema típico de un filtro de disco rotatorio. ....	16
Figura 2.7 Filtros de banda rígida instalados en una mina de cobre. ....	17
Figura 2.8 Ejemplo de una placa cerámica. ....	20
Figura 2.9 Vista sección transversal de un filtro cerámico. ....	20
Figura 2.10 Principio de operación del filtro cerámico.....	23
Figura 2.11 Tasa de filtración y resistencia específica del queque de concentrado de hematita en relación al pH.....	25
Figura 2.12 Selección de floculante en función del pH. ....	27
Figura 4.1 Humedad histórica de Puerto Punta Totoralillo, filtros línea PM.....	39
Figura 4.2 Prueba de humedad Filtro N°3 Puerto Punta Totoralillo.....	40
Figura 4.3 Prueba de humedad Filtro N°1 Puerto Punta Totoralillo. ....	41
Figura 4.4 Estado de piscina posterior al aditivo utilizado en el Filtro N°3 (izquierda) y Filtro N°1 (derecha). ....	44
Figura 4.5 Recuento microbiológico de mesófilos aerobios (izquierda) y recuento de células vivas por microscopía de epifluorescencia (derecha). ....	46
Figura 4.6 Recuento microbiológico de mesófilos aerobios (izquierda) y recuento de células vivas por microscopía de epifluorescencia (derecha). ....	48
Figura 4.7 Prueba de dosificación con ayuda filtrado SNF Flodri DA 470. ....	50
Figura 4.8 Prueba de dosificación con ayuda filtrado SNF WSR 301. ....	51
Figura 4.9 Prueba de dosificación con ayuda filtrado mezclas de ambos aditivos. ....	52

## INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Espesor del queque y humedad promedio Filtro N°3. ....	41
Tabla 4.2 Espesor del queque y humedad promedio Filtro N°1. ....	42
Tabla 4.3 Resultados de cuantificación de bacterias viables y recuento de bacterias aerobias mesófilas. ....	45
Tabla 4.4 Resultados de cuantificación de bacterias viables y recuento de bacterias aerobias mesófilas. ....	47
Tabla 4.5 Costos generales de los aditivos asociados al consumo. ....	53
Tabla 4.6 Datos técnicos de referencia. ....	54
Tabla 4.7 Análisis económico de las propuestas. ....	55
Tabla 7.1 Valores registrados de las pruebas con el aditivo Green Cleaning en el Filtro N°3 .....	67
Tabla 7.2 Valores registrados de las pruebas con el aditivo Green Cleaning en el Filtro N°1 .....	67
Tabla 7.3 Base de datos resumida registrada para el modelo predictivo. ....	68
Tabla 7.4 Estadísticas de la regresión. ....	69
Tabla 7.5 Análisis de varianza. ....	69

## **RESUMEN**

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el rendimiento de los filtros cerámicos Larox CC-144 de Puerto Punta Totoralillo y proponer alternativas para reducir la humedad del queque de concentrado de hierro proveniente de Planta Magnetita. Para ello, se combinó el análisis de parámetros operacionales, ensayos experimentales, evaluación económica y modelamiento predictivo basado en datos reales. Primero, se caracterizó el proceso de filtración, identificando variables críticas como la distribución granulométrica, el pH, el tiempo de ciclo, el estado de los discos cerámicos y el funcionamiento de los transductores de ultrasonido. Luego, se realizaron pruebas con aditivos como Green Cleaning HP (agente de limpieza microbiológica), WSR 301 y Flodri DA 470, evaluando su efecto sobre la humedad y la eficiencia de filtrado. Los resultados mostraron que la humedad está fuertemente influenciada por factores físicos y mecánicos. Si bien Green Cleaning HP eliminó efectivamente la carga microbiológica, se concluyó que esta no es causa relevante del aumento de humedad. Por lo tanto, su uso debe considerarse como complemento de limpieza y no como solución principal al problema de humedad. Además, se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple con 5.682 datos operacionales, logrando un  $R^2$  de 0,83. Las variables más influyentes fueron el estado del transductor, el torque del espesador, el porcentaje de sólidos y la ley de azufre. El modelo permite anticipar escenarios de alta humedad y orientar mejoras operacionales. En conjunto, este trabajo aporta una base técnica y económica sólida para optimizar el proceso de filtración y reducir costos asociados al secado y transporte del concentrado.

### **Palabras Claves:**

Filtración cerámica, humedad residual, concentrado de hierro, aditivos químicos, Green Cleaning HP, transductores ultrasónicos, distribución granulométrica, modelamiento predictivo, optimización de procesos, Planta Magnetita.

## **ABSTRACT**

This thesis aims to analyze the performance of the Larox CC-144 ceramic filters at Puerto Punta Totalillo and propose viable alternatives to reduce the moisture content in iron concentrate filter cakes from Planta Magnetita. The approach integrates operational parameter analysis, experimental testing, economic evaluation, and predictive modeling based on real operational data. Key variables such as particle size distribution, pH, filtration cycle time, ceramic disc condition, and transducer operation were studied in detail. Laboratory tests using chemical additives such as Green Cleaning HP (a microbiological cleaning agent), WSR 301, and Flodri DA 470 were conducted to assess their effects on filtration efficiency and moisture content. Results showed that moisture is primarily affected by physical and mechanical factors. Although Green Cleaning HP effectively removed microbial load, it was concluded that bacteria are not a significant cause of high moisture. Therefore, the additive serves as a complementary cleaning tool rather than a primary solution for humidity control. A multiple linear regression model was developed using 5.682 operational records, yielding an  $R^2$  of 0,83. The most influential variables were transducer condition, thickener torque, solid percentage, and sulfur grade. The model allows for anticipating high-moisture scenarios and supports decision-making for process improvements. Overall, the study provides a solid technical and economic foundation to optimize filtration, lower residual moisture, and reduce costs related to drying and concentrate transport.

### **Keywords:**

Ceramic filtration, residual moisture, iron concentrate, chemical additives, Green Cleaning HP, ultrasonic transducers, particle size distribution, predictive modeling, process optimization, Magnetite Plant.

# 1 CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes generales

El mineral de hierro es una fuente económicamente viable de hierro metálico (Fe). Se estima que los recursos mundiales de mineral de hierro superan los 200 mil millones de toneladas, de las cuales se pueden extraer aproximadamente 88 mil millones de toneladas de hierro contenido (Jaganmohan, 2025). Este mineral se utiliza principalmente en la producción de acero y se extrae en alrededor de cincuenta países. Los principales países productores del mineral de hierro, responsables de tres cuartas partes de la producción mundial total son: Australia, Brasil, China, India, Rusia, Irán y Canadá (Fernández, 2024). Australia y Brasil son los principales exportadores, cada uno contribuye con un tercio de las exportaciones mundiales totales de mineral de hierro (Fernández, 2024).

El hierro se utiliza directamente en forma de mineral en trozos o se somete a un proceso de transformación para obtener briquetas, concentrados, pellets, pepitas de hierro, hierro reducido directo (DRI) o sinter (Ruth, 2004). Entre los minerales de hierro, las formas predominantes son la magnetita,  $Fe_3O_4$  (72 % de Fe), y la hematita,  $Fe_2O_3$  (70 % de Fe), que constituyen la mayor parte del mineral disponible. En menor proporción se encuentran la goetita,  $FeO(OH)$  (63 % de Fe), y la limonita, que es una mezcla de óxidos hidratados de hierro (hasta un 60 % de Fe) (IronExpert, 2024).

En el contexto de Chile, el país produjo 19 millones de toneladas de mineral de hierro en 2021 (Jaganmohan, 2024), situándolo en el puesto 13 a nivel mundial. La producción chilena es significativamente menor en comparación con Australia, que produjo 900 millones de toneladas en el mismo año (Mineral Commodity Summaries, 2022). Las exportaciones de mineral de hierro de Chile se valoraron en aproximadamente 2.500 millones de dólares en 2021 (Trading Economics, s.f). El principal productor en Chile es Compañía Minera del Pacífico (CMP), que representa el 84% del negocio del grupo CAP, el mayor productor de acero en la costa pacífica de América y tercer mayor operador portuario de Chile (CAP, s.f).

El procesamiento de relaves con contenido de hierro, particularmente provenientes de faenas de cobre, se ha convertido en una alternativa eficiente dentro de la economía circular minera. En este tipo de plantas, el proceso comienza con la recepción de material, el cual

puede llegar mediante sistemas de transporte hidráulico o por camiones, dependiendo de su origen.

Una vez recibido, el material es sometido a una etapa de chancado y cribado, que permite reducir el tamaño de las partículas y preparar el mineral para las siguientes fases (En el caso de particular de Planta Magnetita no existe esta etapa de chancado y cribado). A continuación, se lleva a cabo una molienda que busca alcanzar el tamaño de liberación adecuado para una eficiente separación del hierro respecto a la ganga.

Luego, el mineral molido pasa por una etapa de concentración magnética primaria, donde se separan los minerales ferromagnéticos del resto del material. Esta etapa es clave para recuperar el hierro presente en los relaves. Posteriormente, se realiza un deslamado, cuyo objetivo es remover las partículas finas que puedan interferir en la eficiencia de los procesos de concentración siguientes.

Después del deslamado, se aplica una segunda concentración magnética, orientada a mejorar la calidad del concentrado mediante la eliminación de impurezas residuales. Finalmente, se emplea una flotación neumática inversa, un proceso que permite reducir el contenido de sílice y otras impurezas no magnéticas, logrando así un concentrado de hierro con alta ley. Procesos adicionales de separación sólido-líquido se aplican para asegurar que el concentrado se deshidrate suficientemente y alcance alrededor del 8% de humedad requerido en el producto final (Sandgren, 2013).

La separación sólido-líquido es una operación unitaria esencial empleada en diversas industrias, incluyendo las de productos químicos, alimentos y minería. El propósito de esta operación es separar sólidos de líquidos, de manera que los sólidos puedan ser recolectados y concentrados para su uso o disposición, mientras que el líquido puede ser recuperado para su reutilización o eliminación.

La separación sólido-líquido se lleva a cabo generalmente por sedimentación o filtración. Esta última puede ejecutarse por gravedad, vacío, presión o fuerza centrífuga, eligiendo el método más adecuado según las características del proceso. La selección de la mejor tecnología disponible para proporcionar la solución más eficiente y rentable que

cumpla con los requisitos específicos del proceso es crítica para asegurar el éxito operativo óptimo (Montero, 2012).

Tradicionalmente, se ha empleado la filtración al vacío convencional para deshidratar el producto de mineral de hierro en su beneficio; sin embargo, con los cambiantes requisitos de calidad del producto y la disminución de las leyes del mineral, sumado a una mineralogía más compleja y al aumento de los costos energéticos, se buscan soluciones de deshidratación alternativas y más eficientes. El desarrollo de grandes unidades cerámicas con amplias áreas de filtración ha llevado a una mejor comprensión de la deshidratación del mineral de hierro y ha permitido la optimización de las unidades de filtro cerámico para operaciones de alta capacidad (Görres & Hindström, 2007).

Pirkonen (2010) describe la filtración cerámica como la tecnología más adecuada para deshidratar suspensiones con alta y consistente concentración de sólidos y con un rango de tamaño de partículas entre 30  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$ . La filtración cerámica se utiliza ampliamente para concentrados de metales base, ferro-cromo y productos de mineral de hierro, lo que demuestra su aplicación industrial.

La tecnología de filtración cerámica se introdujo en la década de 1980, pero solo se aplicó en la industria del mineral de hierro en la década de 2000 (Görres & Hindström, 2007). Los discos de filtro cerámico son filtros de disco de vacío que comprenden placas de alúmina sinterizada con microporos uniformes. Los microporos inducen succión por efecto capilar; el medio filtrante, a su vez, retiene las partículas sólidas y permite únicamente el paso del líquido durante la filtración. Se forma una torta de filtración en la superficie del disco y se retira mediante una rasqueta. El mecanismo y principio operativo de la tecnología se describen en varios trabajos. Se logran ahorros significativos de energía debido a la ausencia de aire que penetre en los discos cerámicos, y se afirma que una unidad de filtro de vacío tradicional equivalente requeriría aproximadamente un 10% más de energía para crear un vacío similar debido a la alta fuga de aire a través de la torta de filtración (Görres & Hindström, 2007).

Otros beneficios mencionados incluyen: Baja inversión de capital, bajos costos operativos, alta capacidad, torta de filtración seca, contenido de humedad estable, filtrado

libre de partículas, altas tasas de filtración, instalación, operación y mantenimiento sencillo de la unidad de filtración, sistema de filtro y auxiliares integrados, operación continua, características de automatización que permiten un control independiente de la formación y secado de la torta, alta disponibilidad operativa, vida útil prolongada de las placas, medios inertes, resistentes a la mayoría de los productos químicos y temperaturas de la suspensión, no es necesario cambiar la tela del filtro.

En Puerto Punta Totalillo, operado por Compañía Minera del Pacífico (CMP), se emplea filtración cerámica en la etapa final de deshidratación del concentrado de hierro. Este puerto, ubicado en la Región de Atacama, Chile, recibe pulpa de mineral de hierro transportada desde la Planta Magnetita a través de un concentrado subterráneo de 120 kilómetros (Consejo Minero, 2022). La pulpa se concentra primero en espesadores para aumentar su porcentaje de sólidos y luego se filtra en unidades cerámicas, reduciendo su humedad al nivel establecido para el producto que se embarque.

En 2014, se llevó a cabo la construcción y montaje de una nueva planta de filtrado en Puerto Punta Totalillo, que incluyó la instalación de tres filtros de discos cerámicos Larox. Esta ampliación permitió a CMP mejorar la eficiencia en el proceso de deshidratación del concentrado de hierro, disminuyendo la humedad del producto para su almacenamiento y transporte (CONPAX, 2014).

La humedad del concentrado influye de manera directa en el manejo, transporte y procesamiento subsecuente del material, lo que se traduce en mayores costos operativos y desafíos en la operación industrial. En la industria metalúrgica, la humedad presente en los concentrados de hierro representa un reto crítico, ya que afecta la eficiencia de los procesos posteriores (Quast, 2018).

En sistemas de filtración, en especial aquellos basados en filtros cerámicos, se procura disminuir el contenido de agua en la torta de filtración para obtener un producto final con características óptimas. Diversos factores, tales como las propiedades fisicoquímicas del mineral y las condiciones operativas del proceso de filtración, determinan el comportamiento del agua durante la separación del sólido (Görres & Hindström, 2007).

Comprender la dinámica de la humedad resulta esencial para desarrollar soluciones tecnológicas que alcancen niveles óptimos, por ejemplo, un 8,4% de humedad, requisito indispensable para garantizar la seguridad durante el transporte marítimo del concentrado, ya que un exceso de agua no solo dificulta su manipulación y almacenamiento, sino también representa un riesgo para la estabilidad de la embarcación y seguridad de su tripulación.

La presente investigación se orienta a mejorar el desempeño del proceso de filtrado en los filtros cerámicos que tratan el concentrado proveniente de la Planta Magnetita, procesado en el Puerto Punta Totoralillo y operado por la Compañía Minera del Pacífico (CMP). Esta optimización tiene como objetivo garantizar condiciones adecuadas para su almacenamiento y transporte, además de reducir los costos operativos asociados al exceso de humedad.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Analizar el rendimiento de los filtros cerámicos en Puerto Punta Totoralillo para optimizar el proceso de filtrado y disminuir el porcentaje de humedad del concentrado de hierro proveniente de Planta Magnetita.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

1) Analizar diferentes parámetros tales como pH, distribución granulométrica, tiempo de filtrado, estado de discos y cómo estos afectan la humedad del queque de concentrado de hierro.

2) Investigar la influencia de la limpieza de las placas cerámicas y estado de transductores en el desempeño del filtro cerámico.

3) Analizar diferentes propuestas de mejoras desde el punto de vista económico y como estas afectan el rendimiento en puerto.

4) Evaluar y monitorear la eficacia del aditivo Green Cleaning, en la limpieza de placas y en la prevención de formación de bacterias durante el proceso de filtrado.

5) Proponer un modelo predictivo para analizar datos históricos y sugerir acciones a tomar para optimizar resultados.

### **1.3 Problemática**

La filtración es un proceso fundamental en la producción de pellet feed (PF) para reducir la humedad del concentrado de hierro. En la actualidad, el incremento de partículas ultrafinas (-325#), posible presencia de bacterias y factores externos al filtrado, como tamaño del espesador, ausencia de floculantes, etc., complican lograr humedades óptimas de 8,4% o inferiores a 9%, obteniendo una humedad de salida que oscila entre el 11-13%. Este problema cobra mayor importancia debido a que una humedad excesiva en el concentrado genera costos adicionales asociados a procesos de secado complementarios, necesarios para alcanzar el valor objetivo de 8,4 %. Este nivel no responde a criterios de calidad, sino a requisitos de seguridad marítima, ya que concentrados con mayor contenido de agua no pueden ser embarcados sin poner en riesgo la estabilidad de la nave. Por ello, es crucial optimizar el proceso de filtrado sin comprometer la tasa de producción, buscando un balance entre eficiencia operativa y cumplimiento de los estándares de embarque.

### **1.4 Motivación**

Este desafío resulta inspirador, ya que representa una oportunidad para optimizar un proceso clave que impacta directamente en la eficiencia operativa y en el cumplimiento de las especificaciones del producto final. La posibilidad de aportar mejoras mediante la implementación de prácticas innovadoras y eficientes permite aplicar los conocimientos y experiencias adquiridos durante la formación profesional. Además, abordar esta problemática no solo impacta positivamente en la reducción de costos operativos asociados al exceso de humedad, sino que también incide en un aspecto clave: la seguridad en el transporte marítimo. Garantizar que el concentrado alcance el contenido de humedad objetivo es fundamental para prevenir riesgos durante el embarque, cumpliendo así con los estándares exigidos por la industria y las normativas internacionales.

### **1.5 Delimitaciones**

Este desafío se centra exclusivamente en el proceso de filtrado, el cual presenta una alta complejidad operativa debido a la gran cantidad de variables que deben considerarse simultáneamente para evaluar el comportamiento de la humedad. El problema se delimita al

concentrado proveniente de Planta Magnetita, excluyendo el material transportado por el concentrado desde Cerro Negro Norte.

Además, una limitación relevante es la disponibilidad de recursos económicos, lo que impide la realización de pruebas experimentales, a menos que estas estén previamente planificadas por la empresa. No obstante, se propone el desarrollo de ideas para futuras pruebas que podrían llevarse a cabo, así como la identificación de variables críticas que serán analizadas principalmente mediante la información registrada en el sistema PI Data Link.

## 2 CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Descripción del Proceso

Según información obtenida mediante comunicación personal con operadores de sala de control en Puerto Punta Totalillo y jefe de filtrado y embarque. El proceso inicia en las faenas mineras, en plantas Cerro Negro Norte (CNN) y Planta Magnetita (PM), donde se produce el concentrado de hierro. Este concentrado se transforma en una pulpa que es transportada a través de concentraductos que conectan las plantas de procesamiento con el puerto y que debe poseer las siguientes características: 85% - #325, 65% sólido y <0,2 % S, CNN bombea aproximadamente 12.500 toneladas por día, mientras que PM lo hace con una capacidad de 6.700 toneladas por día. Los concentraductos tienen una longitud de 120 km desde PM hasta el puerto y de 82 km desde CNN hasta el puerto (comunicación personal, 04 de marzo del 2025).

Tal como se observa en la Figura. 2.1, una vez que esta pulpa llega al puerto, cada concentraducto tiene su propio circuito, en relación a la pulpa proveniente de CNN, esta es enviada a un TK agitador de 2900 m<sup>3</sup> el cual para un nivel eficiente de uso tiene un nivel de operación máximo de 90% y mínimo de 14%, para luego enviar este concentrado, que ingresa con 65% sólido al espesador Outotec de 12 m de diámetro y sale con 71% sólido, que distribuye la pulpa a 4 filtros cerámico Outotec Laroc C-144 (Filtro 4, 5, 6 y 7) de 12 discos con 15 placas cada uno, desde el cual se saca un queque con humedad de alrededor del 10% y que se envía a la cancha 2 de CNN que tiene capacidad aprox. de 400.000 toneladas de acuerdo a RCA. Por otra parte, la línea del concentraducto proveniente de PM, es enviada a un TK agitador de 2900 m<sup>3</sup> el cual para un nivel eficiente de uso tiene un nivel de operación máximo de 85% y mínimo de 14%, para luego enviar este concentrado que ingresa con 65% sólido a un espesador Delkor de 10 m de diámetro y sale con 71% sólido, que luego de esto se distribuye la pulpa a 3 filtros cerámicos Outotec Laroc C-144 (Filtro 1, 2 y 3) de 12 discos con 15 placas cada uno, en donde un filtro cerámico de PM es dinámico por lo que dependiendo de la producción de CNN se decide si es necesario moverlo a CNN. El queque obtenido de los filtros cerámicos de Planta Magnetita tiene una humedad residual del orden del 11-13% y se envían por correa transportadora hacia la cancha 1 de PM con capacidad de 350.000 toneladas de acuerdo a RCA en donde se almacena el Pellet Feed con 66% Fe aprox.

Como tercera parte adicional del proceso se tiene una tercera cancha en la cual se recibe material ya sea Sinter Feed que tiene generalmente 62% de Fe o material que no entre en clasificación de Pellet Feed por la ley de hierro. En relación al embarque se debe cumplir con un total aproximado de 554 ktmh/mes, con 8,4% de humedad y %S < 0,2% (comunicación personal, 06 de marzo del 2025).

Otro aspecto relevante a considerar dentro de las condiciones del proceso es el tipo de agua utilizada en el sistema. El abastecimiento de agua proveniente de Cerro Negro Norte (CNN) corresponde a agua filtrada y desalada, mientras que Planta Magnetita (PM) opera exclusivamente con agua 100 % desalada. Además, la planta de filtrado realiza cierres programados del concentraducto con el fin de ejecutar mantenciones preventivas y correctivas en los distintos circuitos: los días martes se detiene el flujo desde Planta Magnetita y los días jueves se interrumpe el suministro desde Cerro Negro Norte, permitiendo así la revisión y mantenimiento de sus respectivas líneas (comunicación personal, 10 de marzo del 2025).

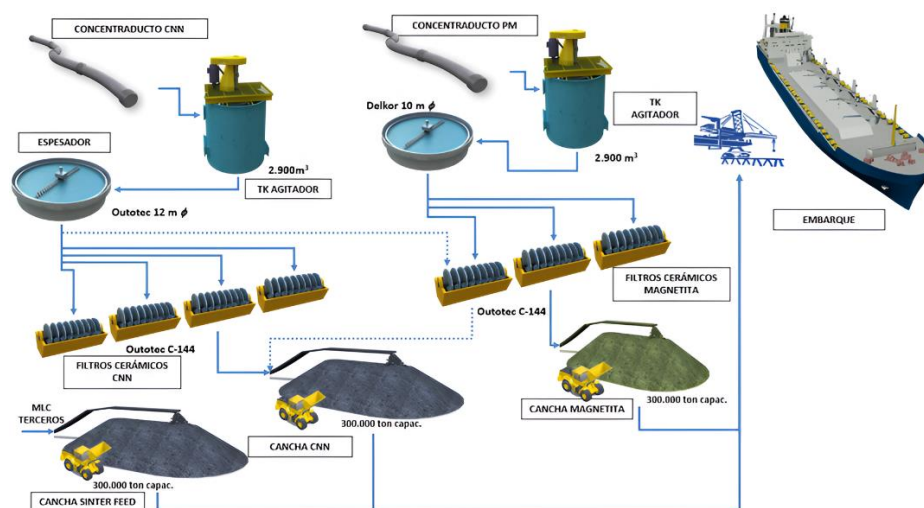


Figura 2.1 Diagrama de proceso Puerto Punta Totalillo (CMP, 2025).

## 2.2 Filtración

### 2.2.1 Filtros de Presión – Filtro Prensa de Placas y Marcos

Debido a la virtual incompresibilidad de los sólidos, la filtración por presión resulta ventajosa respecto a la filtración por vacío, ya que permite mayores tasas de flujo, así como un mejor lavado y secado del sólido gracias a las presiones elevadas utilizadas. Sin embargo,

la mayoría de los filtros de presión operan de forma discontinua, ya que la remoción de sólidos desde la cámara del filtro es compleja (Wills, 1997).

El filtro prensa de placas y marcos es un equipo de operación discontinua que emplea presión. Está construido en distintos materiales y es capaz de procesar líquidos viscosos y tortas con alta resistencia específica (Sinnott, 1993). Las placas y marcos se disponen de forma alternada sobre un par de rieles. Las placas poseen una superficie acanalada y bordes cuidadosamente mecanizados. Un paño filtrante separa el marco hueco de la placa, y el cierre del sistema se realiza hidráulicamente o con un tornillo manual, formando así una cámara entre cada par sucesivo de placas.

La pulpa se introduce por una abertura en cada marco y el filtrado atraviesa el paño por ambos lados, formando simultáneamente dos tortas que se combinan al llenarse el marco. La Figura 2.2 muestra un esquema del filtro prensa de placas y marcos, donde A representa el conducto de entrada; B, las entradas de alimentación; C, la salida del filtrado; D, los marcos; y F, las placas (Coulson & Richardson, 2002).

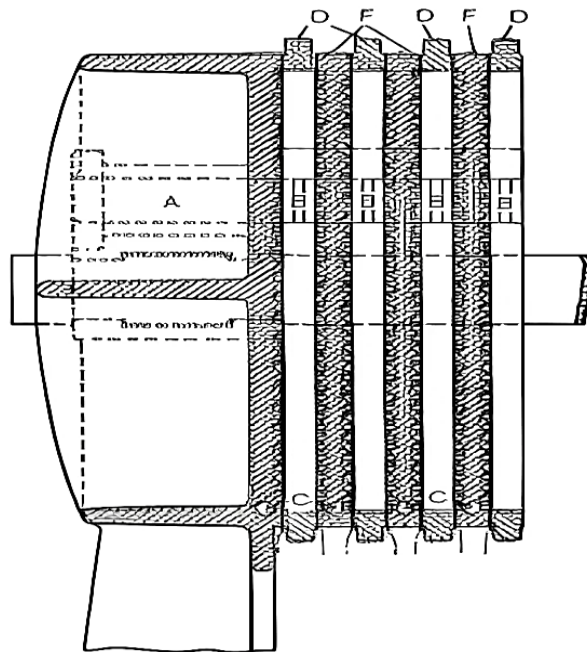


Figura 2.2 Esquema filtro prensa de placas (Coulson & Richardson, 2002).

**Ventajas** (Coulson & Richardson, 2002):

- Alta versatilidad debido a su simplicidad, permitiendo su uso en una amplia variedad de condiciones operativas.
- Bajos costos de mantenimiento.
- Ocupa poco espacio y requiere pocas unidades adicionales.
- Las fugas son fácilmente detectables ya que la mayoría de las uniones son externas.
- Posibilidad de operar a alta presión.
- Es adecuado tanto cuando el producto principal es el queque (queque de filtración) como cuando lo es el líquido (filtrado).

**Desventajas:**

- Operación intermitente y desgaste elevado del paño filtrante debido al desmontaje frecuente.
- Alto requerimiento de mano de obra.

**2.2.2 Filtros de Presión – Filtros de Hoja**

Los filtros de hoja se emplean en aplicaciones similares a los filtros prensa de placas y marcos, aunque con menores costos operativos. Las hojas pueden disponerse en filas horizontales o verticales (Figura 2.3) y están compuestas por marcos metálicos cubiertos con telas o mallas filtrantes. La remoción de la torta se realiza mecánicamente o mediante chorros de agua (Coulson & Richardson, 2002; Sinnott, 1993).

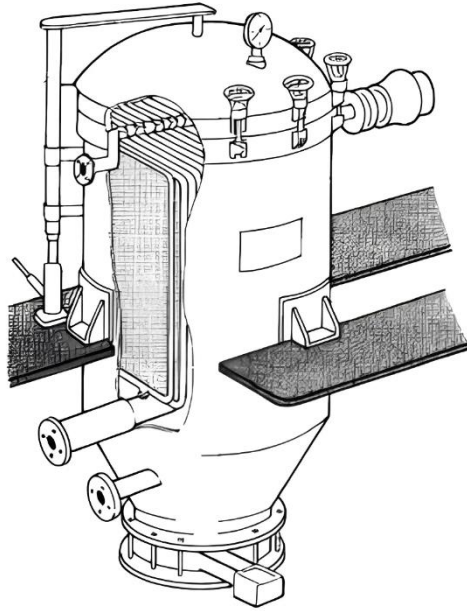


Figura 2.3 Filtro de presión de hojas (Coulson & Richardson, 2002).

Estos filtros están diseñados para la descarga final de sólidos secos o húmedos en condiciones completamente cerradas y operan de forma totalmente automatizada. La pulpa se introduce en un recipiente presurizado, donde los sólidos se retienen en la superficie de la hoja mientras el líquido pasa al circuito de drenaje. La presión, la cantidad de torta o la capacidad del lote determinan el tiempo de ciclo. Se puede aplicar un material de pre-capa, como tierra de diatomeas o perlita, para facilitar la remoción de sólidos muy finos, y se puede realizar el lavado de la torta antes de su descarga (Coulson & Richardson, 2002).

**Ventajas:**

- Aplicaciones similares a los filtros prensa, pero con menores costos operativos y operación en condiciones cerradas.

**Desventajas:**

- Pérdida potencial de material filtrante en la descarga.
- Presenta una mayor demanda de mantenimiento para asegurar la eficiencia del sistema de lavado y descarga, en comparación con otros tipos de filtros.

### 2.2.3 Filtros Centrífugos

El principio de separación en las centrífugas es similar al de los procesos de sedimentación por gravedad, salvo que se alcanza mediante una fuerza gravitacional acelerada, generada por una rotación rápida que multiplica entre 1000 y 2000 veces la gravedad. La rotación es impulsada por un motor.

Las centrífugas de sedimentación incluyen hidrociclones, tambores tubulares, tambores con compartimentos, cestas sin perforaciones, separadores de discos y decantadores (Lenntech, 1998). Originalmente diseñadas para la separación líquido-sólido, su aplicación se ha extendido al manejo y separación de sólidos desde líquidos.

El decantador centrífugo, ilustrado en la Figura 2.4, fue diseñado para manejar una alta concentración de sólidos en la pulpa y lograr una buena clarificación del concentrado líquido. Este equipo consiste en un tambor cilíndrico horizontal (1) que, rota a alta velocidad, en cuyo interior se encuentra un tornillo extractor helicoidal (2) que encaja perfectamente dentro del tambor. Los sólidos se acumulan en las paredes del tambor y la diferencia de velocidad entre el tambor y el tornillo proporciona el movimiento necesario para recolectar y remover los sólidos.

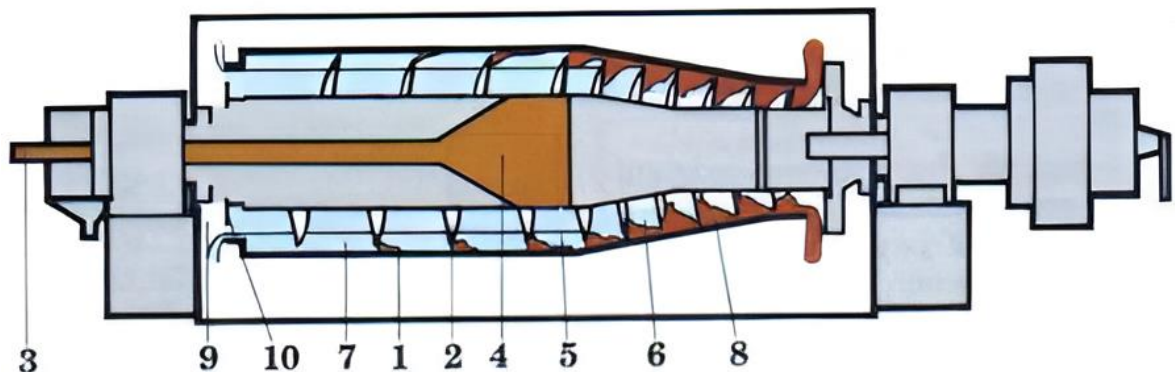


Figura 2.4 Decantador centrífugo (Lenntech, 1998).

La pulpa (3) se introduce axialmente mediante un distribuidor adecuado (4) hacia el espacio anular (5) formado entre el tambor y el tornillo. La separación ocurre en la sección cilíndrica del tambor (1) y el producto sedimentado es transportado hacia la sección cónica mediante la velocidad relativa del tornillo (6). El nivel de líquido (7) se establece en función

de la alimentación continua y sigue la superficie interna del tambor. La zona de secado (8) permite la deshidratación final una vez que los sólidos han salido del anillo de líquido. El líquido clarificado (9) se recoge en el extremo opuesto mediante un umbral ajustable (10) que restringe el anillo de líquido. Todo el sistema se encuentra cubierto por una carcasa que permite recolectar el líquido clarificado y los sólidos sedimentados.

**Ventajas** (Lenntech, 1998):

- Amplia gama de aplicaciones potenciales.
- Operación continua.
- Capacidad de operar con diversas concentraciones de pulpa.
- Disponible en múltiples capacidades de alimentación.
- Ocupa poco espacio en comparación con otras tecnologías de separación.
- Alta eficiencia en la separación sólido-líquido.

**Desventajas:**

- Mayor costo de adquisición y mantenimiento que otros filtros.
- Posibilidad de desgaste prematuro por abrasión, dependiendo del tipo de sólidos manejados.

#### **2.2.4 Filtros al Vacío – Filtros de Tambor Rotatorio**

Los filtros al vacío consisten en un medio filtrante sostenido por un sistema de drenaje, donde se emplea un sistema de vacío para reducir la presión. Estos filtros pueden operar de forma discontinua o continua (Wills, 1997). El filtro de tambor rotatorio es el filtro al vacío más utilizado. Existen dos tipos principales: los que generan vacío en compartimientos individuales sobre la periferia del tambor y los que aplican vacío a todo el interior del tambor. La Figura 2.5 muestra un diseño típico de instalación de un filtro de tambor rotatorio (Konline-Sanderson, 2014).

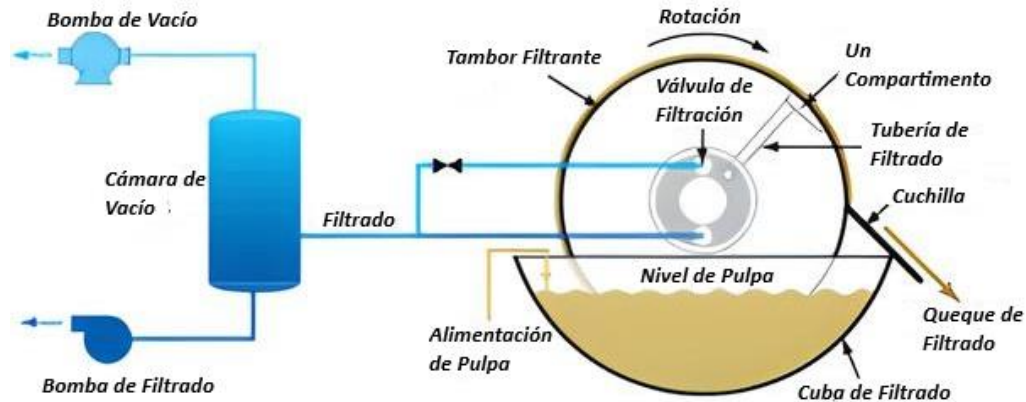


Figura 2.5 Diseño típico de filtro de tambor rotatorio (Komline-Sanderson, 2014).

Este equipo está compuesto por un medio filtrante dispuesto alrededor de un gran tambor hueco que gira sobre un eje horizontal parcialmente sumergido en un tanque con la pulpa. Se utilizan agitadores para mantener la pulpa en suspensión. La periferia del tambor está dividida en compartimentos, cada uno con líneas de drenaje internas conectadas a un anillo de puertos cubiertos por una válvula rotatoria a la cual se aplica el vacío. Este vacío permite que el líquido atraviese el medio filtrante y se deposite en la superficie del tambor, reteniendo los sólidos (Komline-Sanderson, 2014).

El ciclo de operación típico incluye filtración, secado y descarga. También pueden incorporarse etapas como el lavado de la torta y la limpieza del paño. El tiempo del ciclo depende de la velocidad de rotación, el nivel de suspensión en el tanque y la configuración de la válvula. La descarga de sólidos puede hacerse mediante un sople de aire que levanta la torta o mediante un sistema de descarga por correa que permite manejar tortas más delgadas, facilitando el lavado y obteniendo productos más secos. Este método también permite lavar el paño por ambos lados antes de su retorno al tambor. La capacidad de la bomba de vacío depende principalmente de la cantidad de aire aspirado durante el lavado y secado de la torta. Existen variantes como los filtros hiperbáricos, que permiten filtración a presión con operación continua (Coulson & Richardson, 2002; Sinnott, 1993; Wills, 1997).

**Ventajas** (Coulson & Richardson, 2002):

- Versatilidad y simplicidad.

- Bajo costo por unidad de área en tambores de múltiples compartimentos
- Operación continua.

**Desventajas:**

- Equipos voluminosos que requieren gran superficie de instalación.
- El paño filtrante requiere lavado y reemplazo frecuente.

**2.2.5 Filtros al Vacío – Filtros de Disco**

Los filtros de disco operan bajo el mismo principio que los filtros de tambor rotatorio. Están formados por discos circulares conectados a un eje horizontal central, sobre cuyas superficies se forma la torta. A medida que los discos giran por encima del nivel de la suspensión, la torta se seca por succión y se descarga mediante aire pulsado y un raspador. Varios discos en el eje permiten una gran área de filtración en un espacio reducido, lo que resulta en un menor costo por unidad de área en comparación con los filtros de tambor (Wills, 1997). La Figura 2.6 muestra un esquema típico de un filtro de disco rotatorio.

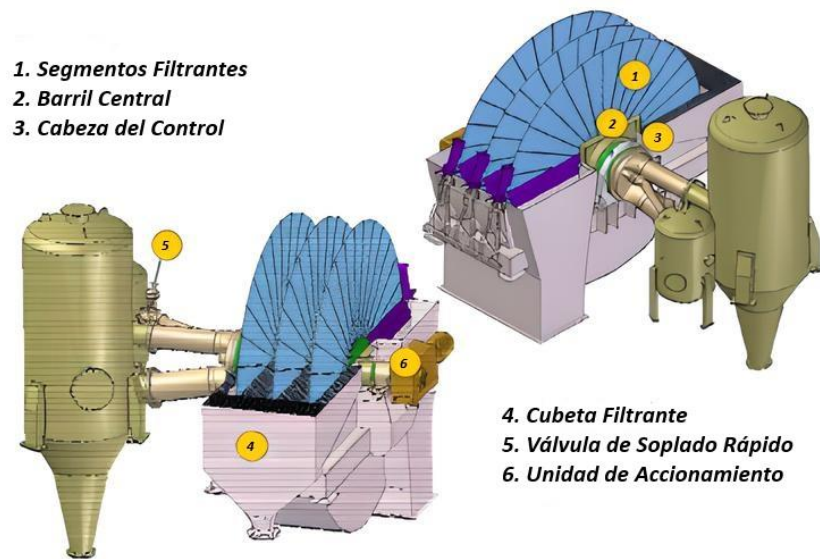


Figura 2.6 Esquema típico de un filtro de disco rotatorio (Wills, 1997).

**Ventajas (Wills, 1997):**

- Gran área de filtración en un espacio reducido.

- Menor costo por unidad de área que los filtros de tambor.

**Desventajas (Wills, 1997):**

- Lavado de la torta prácticamente imposible.
- Materiales muy finos pueden obstruir el medio filtrante.
- Requieren detención para limpieza.

### **2.2.6 Filtros al Vacío – Filtros de Banda Horizontal**

El filtro de banda horizontal consiste en una plataforma perforada de drenaje que sostiene una banda de tela filtrante. Se aplica vacío a cajas de succión en contacto con la parte inferior de la plataforma. La suspensión se alimenta por gravedad sobre la banda, iniciándose inmediatamente la filtración gracias a la combinación de gravedad y vacío. El secado ocurre al aspirarse el aire a través de la torta, y la descarga se realiza al invertirse la banda sobre un rodillo de pequeño diámetro. Puede integrarse una etapa de lavado de la torta. Estos filtros son adecuados para procesos hidrometalúrgicos donde los metales valiosos están disueltos en soluciones ácidas o alcalinas, y para suspensiones concentradas de productos de sedimentación rápida, donde se requiere un lavado eficiente (Wills, 1997). La Figura 2.7 muestra un filtro de banda rígida instalado en una mina de cobre en Chile.



Figura 2.7 Filtros de banda rígida instalados en una mina de cobre en Anglo American en Chile (Wills, 1997).

**Ventajas (Wills, 1997):**

- Bajo costo de capital en comparación con filtros de tambor, disco y prensa.
- Solución confiable y económica, especialmente para relaves de bajo valor.
- Menor humedad en tortas de carbón en comparación con filtros rotatorios, a menor costo por tonelada.

**Desventajas:**

- Requieren alto consumo energético.

### **2.2.7 Filtración Cerámica**

Anteriormente se utilizaba la filtración al vacío convencional para desaguar productos de mineral de hierro. Debido a los cambios en la calidad del producto, disminución en las leyes de mineral, mayor complejidad mineralógica y aumento en los costos energéticos, se han buscado soluciones de filtrado más eficientes. El desarrollo de unidades cerámicas de mayor tamaño y área de filtración ha permitido una mejor comprensión del proceso y optimización de filtros cerámicos de alta capacidad (Görres & Hindström, 2007).

Según Pirkonen et al. (2010), la filtración cerámica es adecuada para suspensiones con alta concentración de sólidos y tamaño de partículas entre 30  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$ . Esta tecnología se aplica industrialmente en concentrados de metales base, ferroaleaciones y productos de mineral de hierro (Pirkonen et al., 2010).

La tecnología fue introducida en los años 80, pero comenzó a utilizarse en la industria del hierro recién en el año 2000 (Görres & Hindström, 2007). Los discos cerámicos son filtros de disco al vacío formados por placas sectoriales de alúmina sinterizada con microporos uniformes, que generan succión por acción capilar, permitiendo el paso únicamente de líquido. La torta se forma sobre la superficie del disco y se remueve con un raspador.

**Ventajas** (Görres & Hindström, 2007; Salmimies et al., 2013):

- Baja inversión de capital.
- Bajos costos operativos.
- Alta capacidad.

- Tortas secas y contenido de humedad estable.
- Filtrado libre de partículas.
- Altas tasas de filtración.
- Instalación, operación y mantenimiento simples.
- Sistemas integrados y automatizados.
- Operación continua con control independiente de formación y secado de torta.
- Alta disponibilidad operativa.
- Larga vida útil de las placas.
- Medio inerte resistente a productos químicos y temperaturas elevadas.
- No requiere cambio de paños filtrantes.

**Desventajas:**

- Alta inversión inicial.
- Costo elevado de ácidos para limpieza y regeneración.
- Sustitución costosa de placas cerámicas.

La acción capilar generada por los microporos permite succión al contacto con agua. Los discos se sumergen en un baño de suspensión y el filtrado se dirige hacia un barril central. El medio filtrante permite el paso únicamente del líquido, formándose una torta en la superficie externa del disco. La Figura 2.8 muestra un ejemplo visual de las placas cerámicas y la Figura 2.9 presenta una vista en corte transversal de la placa (Larox Corporation, 2007).



Figura 2.8 Ejemplo de una placa cerámica (Larox Corporation, 2007).

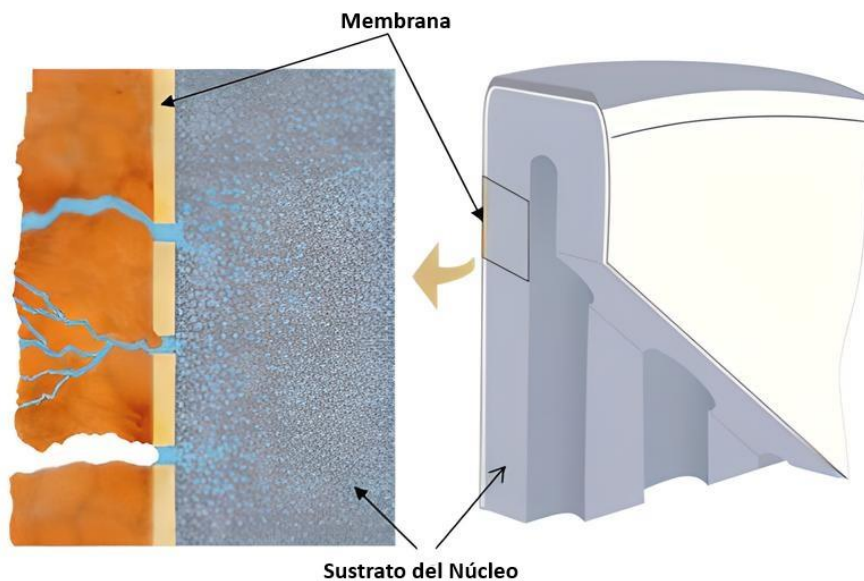


Figura 2.9 Vista sección transversal de un filtro cerámico (Larox Corporation, 2007).

### 2.3 Mecanismo de Filtración

El mecanismo principal por el cual funciona un filtro cerámico es la acción capilar. Este fenómeno se describe mediante la ley de Young-Laplace presentada en la ecuación 2.1,

que cuantifica cómo los poros de un determinado diámetro generan un efecto capilar debido a la tensión superficial y al ángulo de contacto del líquido.

$$\Delta\rho = \frac{4T \cdot \cos\theta}{D} \quad (2.1)$$

Donde  $\Delta\rho$  = presión del punto de burbuja (bar)

T = tensión superficial (N/m) [0,07 para H<sub>2</sub>O a 20°C]

$\Theta$  = ángulo de humectación (grados) [ $0^\circ$  ( $\cos\theta = 1$ )]

D = diámetro de poro ( $\mu\text{m}$ )

La ecuación de Young-Laplace establece que la presión necesaria para superar la fuerza capilar y vaciar un capilar lleno de agua se conoce como presión del punto de burbuja. Cuando un tubo estrecho se sumerge en agua, el nivel del líquido asciende por encima de la superficie del agua debido a la acción capilar.

Un material altamente humectable, como el óxido de aluminio, tiene un ángulo de humectación de cero grados, lo que permite un ascenso capilar significativo. En cambio, materiales como el teflón, con un ángulo de humectación cercano a noventa grados, prácticamente no presentan ascenso capilar y no requieren presión para vaciar el capilar.

## 2.4 Principios de Operación del Filtro Cerámico

Los proveedores de unidades cerámicas describen el proceso de filtración mediante cinco pasos: formación del queque, secado del queque, descarga del queque, retro lavado y regeneración del disco.

### 2.4.1 Formación de Queque

Los discos de las placas microporosas giran a través de la pulpa, lo que activa de inmediato la acción capilar sin necesidad de una fuerza externa. Una bomba de vacío crea un espacio casi absoluto que extrae el líquido a través de los discos hacia las líneas de filtrado. Los sólidos y el aire no penetran en la superficie de los discos debido a su estructura microporosa, por lo que los sólidos se acumulan rápidamente en ella. (Figura 2.10, número 1)

#### **2.4.2 Secado del Queque**

Mientras los discos continúan rotando, la acción capilar remueve todo el líquido libre de los sólidos. La estructura microporosa permite únicamente el paso del líquido y, debido a la fuerza capilar que mantiene los poros llenos de agua, el aire no penetra la superficie del disco. Esto produce un queque excepcionalmente seco con mucho menos consumo de energía que las técnicas de filtración convencionales (Figura 2.10, número 2)

#### **2.4.3 Descarga del Queque**

Se utilizan raspadores para retirar el queque del disco, dejando un delgado recubrimiento que protege la superficie contra la abrasión mecánica. Este método reduce el mantenimiento y extiende la vida útil de los discos, sin requerir un sistema de descarga brusca como el de los filtros rotatorios al vacío (Figura 2.10, número 3).

#### **2.4.4 Retrolavado**

El retrolavado se utiliza para descargar agua sobre los discos, lo que elimina los residuos y limpia la estructura microporosa. Este retrolavado mantiene la eficacia de la filtración y extiende la vida útil de los discos. Una vez que se completa una rotación, el sistema retrolava alimentando una pequeña parte del filtrado hacia las placas del filtro inmediatamente después de los raspadores, controlando la presión de forma automática. (Figura 2.10, número 4).

#### **2.4.5 Regeneración de Disco.**

Periódicamente se regeneran los discos para mantener su permeabilidad completa. Se emplean sistemas químicos y/o ultrasónicos integrados (Figura 2.10, número 5). La frecuencia de limpieza varía según la aplicación, puede ser de manera diaria o semanal, especialmente cuando se filtran fracciones submicrónicas. El proceso es automatizado mediante un sistema de control lógico (PLC) y requiere rellenar el tanque con líquido de lavado con concentración a definir por la empresa (ácido nítrico).

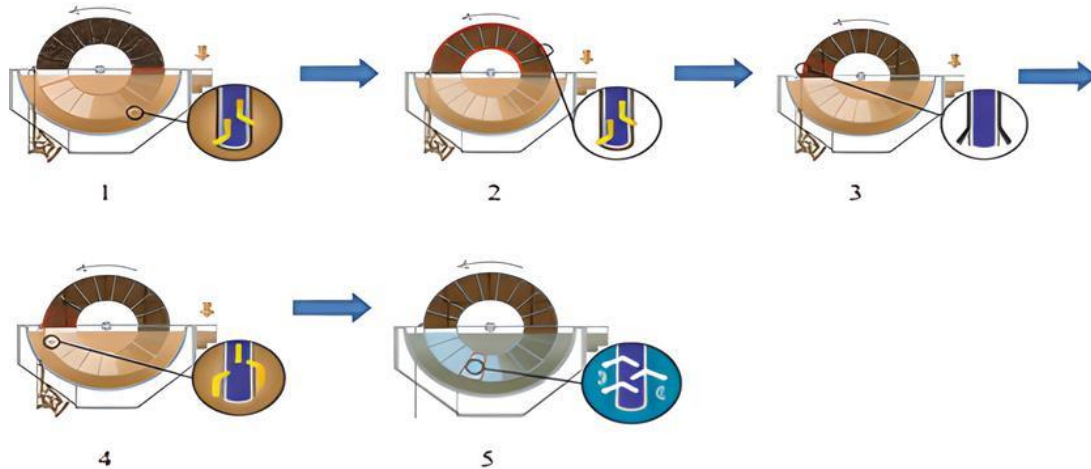


Figura 2.10 Principio de operación del filtro cerámico (Larox Corporation, 2007).

## 2.5 Discos Outotec CC-144.

Outotec obtiene la titularidad de todas las acciones de Larox en 2010, lo que permite que las tecnologías de filtración de Larox complementen el portafolio de productos de Outotec. La patente asignada a sus filtros cerámicos es OUTOTEC LAROX® CERAMIC FILTERS, ofrecen una gama de filtros de acción capilar que se adaptan a distintos tamaños de proceso y requerimientos de caudal. La línea de filtros incluye:

- Outotec Larox® CC-6
- Outotec Larox® CC-15
- Outotec Larox® CC-30
- Outotec Larox® CC-45
- Outotec Larox® CC-144
- Outotec Larox® CC-240

El filtro Outotec Larox® CC-144 utilizado actualmente en los filtros cerámicos de Puerto Punta Totoralillo forma parte de la gama HiFlow de Outotec, diseñado para aplicaciones de alta capacidad y alto caudal de filtrado. Este equipo presenta un área de filtración de 144 m<sup>2</sup>, cuenta con 180 placas y tiene un diámetro de disco de 3800 mm. El control en la etapa de formación del queque permite ajustar la capacidad, mientras que el

ajuste del vacío en la fase de secado regula la humedad residual del pastel. Su diseño compacto integra el panel de control, la bomba de vacío, el tanque de filtrado, los accionamientos del tambor y del agitador, además de una unidad de limpieza ultrasónica.

## **2.6 Factores que Afectan la Filtración Cerámica.**

### **2.6.1 Potencial Zeta**

Görres y Hindström (2007) indican que la presencia de finos e impurezas en la alimentación de una planta de pellet feed afecta la deshidratación de las pulpas de mineral de hierro, ya que estos elementos provocan el ensuciamiento de las membranas y bloquean poros. Explican que los distintos potenciales zeta de las partículas, según el pH, modifican las interacciones electrostáticas entre el mineral, la sílice y otras impurezas, afectando el rendimiento de la filtración. Además, sugieren que se puede mejorar la filtración al modificar el pH, lo que altera la reología del sistema. En CMP el rango de pH oscila entre 10-11 y teniendo en consideración el potencial zeta de la magnetita el pH debiese oscilar entre 6-7,5 para llegar al punto isoeléctrico de esta (Caudillo, 2023).

El potencial zeta se define como la medida de la repulsión o atracción electrostática entre partículas, siendo clave para la estabilidad de un sistema coloidal. Según Malvern Instruments, una suspensión es estable cuando el potencial es mayor a +30 [mV] o menor a -30 [mV], mientras que valores cercanos a cero indican inestabilidad, ya que las partículas tienden a agregarse. El punto isoeléctrico, donde el potencial es cero, marca la mínima estabilidad del sistema.

Si bien los ensayos descritos por Haselhuhn (2012) están enfocados en hematita como se ve en la Figura 2.11, es posible extrapolar ciertos principios al caso de la magnetita, dado que ambos minerales comparten características coloidales y electrocinéticas similares. Tanto la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) como la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) son óxidos de hierro que desarrollan carga superficial dependiente del pH, y poseen un punto isoeléctrico (PIE) en un rango comparable, usualmente entre pH 6 y 8 (Kosmulski, 2009). Sin embargo, deben considerarse diferencias estructurales importantes: la magnetita contiene hierro en estados mixtos de oxidación ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ), lo que modifica su comportamiento superficial, capacidad de adsorción y potencial zeta en comparación con la hematita. A pesar de estas diferencias, estudios como los de Li y Huang (2013) y Liu et al. (2011) han demostrado que la magnetita también

experimenta una reducción del potencial zeta con el descenso del pH, lo cual puede favorecer la aglomeración de partículas finas y mejorar la eficiencia de procesos como la filtración. Por lo tanto, el enfoque de control de pH como herramienta para inducir coagulación mediante la manipulación del potencial zeta resulta aplicable de manera general a ambos minerales.

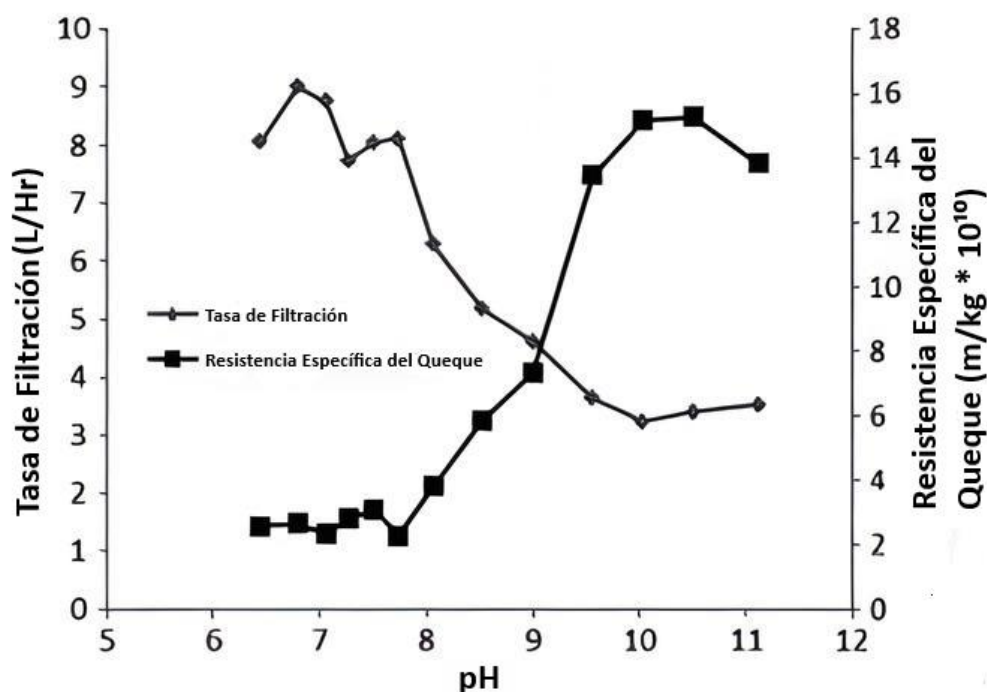


Figura 2.11 Tasa de filtración y resistencia específica del queque de concentrado de hematita en relación al pH (Haselhuhn, 2012).

Los resultados presentados por Carlson y Kawatra (2011) refuerzan la influencia del pH sobre el comportamiento electrocinético de la hematita, demostrando que la adición de CO<sub>2</sub> reduce el pH y desplaza la curva del potencial zeta hacia valores más bajos, lo que promueve la coagulación y floculación de las partículas. Estos autores destacan que, más allá de la compresión de la doble capa iónica, es la complejación de la superficie de la hematita con iones carbonato y bicarbonato la que facilita la neutralización del potencial zeta, generando condiciones favorables para la mejora de la filtración. En la misma línea, Eisele (2005) sostiene que la acidificación del sistema, independientemente del ácido utilizado, disminuye el potencial zeta y promueve la floculación, lo que se traduce en la formación de un queque de filtración más poroso y con menor retención de agua.

Este principio también puede ser considerado válido para la magnetita, debido a su naturaleza coloidal y a la similitud de su punto isoeléctrico con el de la hematita. Aunque la respuesta específica de la magnetita frente a la presencia de CO<sub>2</sub> o ácidos puede diferir ligeramente por su composición mixta de Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>, estudios como los de Liu et al. (2011) indican que la superficie de la magnetita también responde a variaciones de pH con una reducción del potencial zeta y un incremento de la floculación. Asimismo, la formación de complejos superficiales con aniones como el carbonato puede inducir efectos comparables sobre su carga superficial. Por tanto, la estrategia de modificar el ambiente químico mediante gases o acidificación para mejorar la eficiencia de la filtración es teóricamente aplicable a sistemas que contienen magnetita, aunque se recomienda una validación experimental específica para cada caso.

### **2.6.2 Adición de Floculante**

El uso de floculantes en la filtración ha sido ampliamente estudiado. Los polímeros de alto peso molecular generan tasas de sedimentación más rápidas, pero forman flóculos grandes que retienen agua dentro de su estructura, lo que aumenta la humedad en el queque de filtración. En contraste, los floculantes de menor peso molecular producen agregados más pequeños y resistentes al esfuerzo de corte, formando un queque más uniforme y poroso que facilita una deshidratación rápida (Moss & Dymond, 1978). Por ello, los floculantes de bajo peso molecular suelen ser más efectivos para mejorar las tasas de filtración.

Moss y Dymond (1978) explican que dos floculantes con el mismo peso molecular aparente pueden diferir en su distribución molecular, afectando su rendimiento. Un floculante con una distribución amplia, que incluya fracciones altas y bajas, se comporta de manera diferente a uno con una distribución más estrecha y con interacciones intermedias. Además, el pH de la solución influye en la carga superficial de las partículas y en el grado de ionización del polímero, afectando su estructura y capacidad de formación de puentes entre partículas. Como resultado, cada floculante tiene un rango de pH óptimo para su funcionamiento.

Forbes (2011) refuerza esta teoría al señalar que la ionización del polímero, controlada por el pH, determina su grado de extensión molecular y su capacidad de floculación. La base de conocimientos "Improving Thickener Technology" de AMIRA P266 describe cómo la selección de floculantes depende de las propiedades de la superficie de los

sólidos y el pH del sistema. A pH bajos, los polímeros aniónicos están protonados y adoptan una configuración similar a los polímeros no iónicos, aunque estos últimos tienen más grupos funcionales disponibles para la adsorción. A pH superiores a 4, los grupos carboxilato interactúan con sitios cargados positivamente, facilitando la adsorción y reduciendo la dosis de floculante necesaria. Sin embargo, a pH alcalinos superiores a 10, la actividad de los floculantes puede disminuir debido a la competencia entre la hidrólisis de amidas y la adsorción, favoreciendo el uso de polímeros altamente aniónicos que se puede ver en la figura 2.12 (CSIRO, 2011).

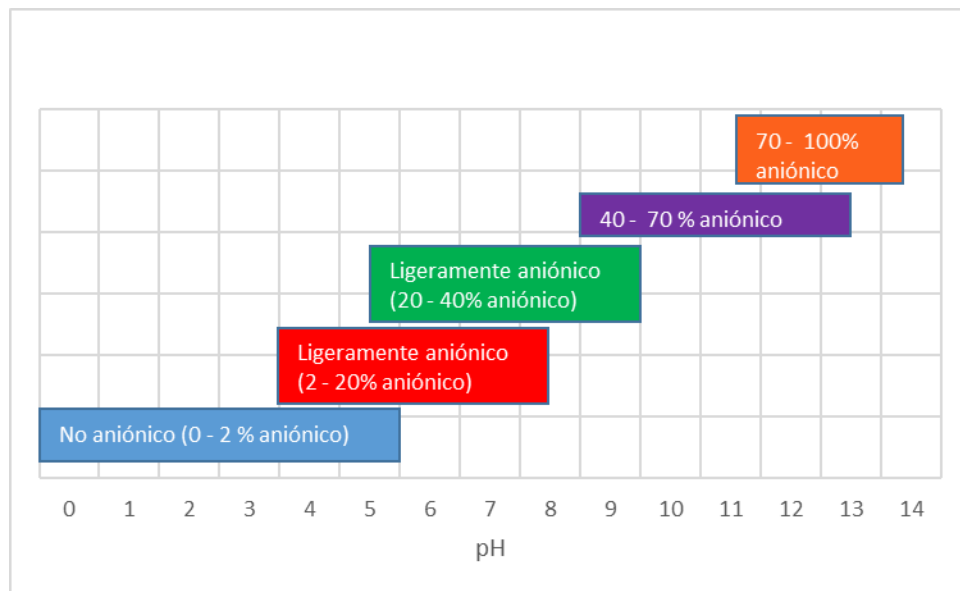


Figura 2.12 Selección de floculante en función del pH (CSIRO, 2011).

Mänttari et al. (1995) analiza el impacto del uso de floculantes en la filtración de concentrados de hierro y concluyen que pequeñas cantidades de floculante aumentan la capacidad de filtración. No obstante, la concentración óptima de floculante depende del tipo de floculante y de la pulpa, ya que diferentes concentrados de hierro presentan variaciones en su capacidad de filtración y en la selección del floculante más adecuado.

### 2.6.3 Distribución Granulométrica

La distribución granulométrica de las partículas presentes en la pulpa de concentrado de hierro influye directamente en el rendimiento del proceso de filtración cerámica y en la humedad final del queque. Cuando existe un alto contenido de partículas finas (menores a 45

$\mu\text{m}$ ), estas tienden a formar un queque más compacto, con menor porosidad, lo que reduce la permeabilidad del medio y dificulta el paso del líquido a través del filtro. Como resultado, se incrementa la humedad residual del concentrado. Por el contrario, una distribución con mayor presencia de partículas gruesas favorece la formación de un queque más poroso, facilitando el drenaje del agua y permitiendo alcanzar más fácilmente el objetivo de humedad.

Además, las partículas ultrafinas tienen la capacidad de penetrar y obstruir los microporos del medio filtrante cerámico, provocando colmatación. Esta situación reduce la tasa de filtración y exige limpiezas más frecuentes para mantener la eficiencia del equipo, lo que genera un impacto operativo negativo. Asimismo, la granulometría afecta la tasa de formación del queque. Una distribución equilibrada permite una formación rápida y uniforme del queque sobre la superficie del disco filtrante, lo que optimiza el ciclo de filtración. En cambio, una proporción elevada de finos puede retardar la formación del queque, prolongando los tiempos de operación necesarios para alcanzar el contenido de humedad requerido entre un 20% y 40% respecto a una distribución granulométrica óptima (Hampton, 1992).

Por último, la estabilidad mecánica del queque también depende de la granulometría. Una distribución controlada contribuye a la cohesión del material filtrado, permitiendo su manipulación y transporte sin que este se rompa fácilmente. En cambio, queques formados principalmente por finos suelen ser más frágiles, lo que puede dificultar su manejo posterior y comprometer la continuidad operativa (Concha, 2001).

#### **2.6.4 Tiempo de Filtrado**

El tiempo de filtrado influye directamente en la cantidad de humedad residual del queque de concentrado de hierro en filtros cerámicos, dado que estos sistemas dependen exclusivamente del efecto mecánico del medio filtrante para la retención y posterior desprendimiento del sólido. En estos filtros, cuanto mayor es el tiempo de residencia del disco cerámico en la pulpa, mayor es el volumen de líquido que puede ser extraído por succión, lo que contribuye a una disminución progresiva de la humedad del queque (Vargas et al., 2019). Sin embargo, existe un punto de equilibrio: extender excesivamente el tiempo de filtrado puede generar un incremento en el espesor del queque, lo cual reduce la eficiencia de secado debido a que la capilaridad del filtro cerámico se ve limitada al alcanzar una

saturación interna, donde el gradiente de presión ya no permite remover agua adicional (Gómez & Arancibia, 2020).

### **2.6.5 Estado de Discos**

El estado de los discos cerámicos es un factor determinante en la eficiencia del proceso de filtración y en la humedad final del queque de concentrado. Dado que estos filtros no utilizan un sistema de soplado para expulsar el líquido residual, el buen funcionamiento del medio cerámico se vuelve esencial para garantizar un drenaje efectivo. Cuando los discos están en óptimas condiciones, es decir, sin saturación interna, sin daño estructural y con una adecuada permeabilidad, la succión generada por el vacío logra extraer una mayor cantidad de líquido, favoreciendo una menor humedad en el queque.

Sin embargo, con el tiempo y el uso continuo, los poros cerámicos pueden obstruirse parcial o totalmente por acumulación de sólidos finos, material orgánico o incluso por precipitación de sales, lo que reduce drásticamente la capacidad de paso del líquido a través del medio filtrante. Esta obstrucción impide el desarrollo completo del gradiente de presión necesario para arrastrar el agua remanente, lo que se traduce en que el queque sale con mayor contenido de humedad, incluso si otros parámetros como el vacío o el tiempo de filtrado se mantienen constantes.

Además, los discos con fisuras, desgaste o pérdidas de hermeticidad pueden generar una distribución irregular del vacío, lo que a su vez causa zonas del disco con menor eficiencia de succión y formación de queques con humedades heterogéneas. Este fenómeno no solo afecta la humedad del producto final, sino que también puede comprometer la operación continua del sistema, ya que un disco en mal estado puede provocar desbalance mecánico, interrupciones y la necesidad de mantenimiento no programado (Ramírez, 2009).

## **2.7 Transductores**

Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra. En el caso de los transductores de ultrasonido, transforma energía eléctrica en vibraciones mecánicas (ondas sonoras) y viceversa. Esta propiedad permite que la mayoría de estos dispositivos se utilicen también en aplicaciones de pulso-eco, aunque en el ámbito de filtración cerámica su función principal es la limpieza de los discos.

En los filtros cerámicos, el transductor ultrasónico se emplea para mantener limpios los poros del medio filtrante. A través del efecto piezoeléctrico, materiales como el cuarzo o el titanato de bario cambian de dimensión al aplicarles un campo eléctrico, generando ondas ultrasónicas que inducen microvibraciones. Estas ondas desprenden partículas finas que obstruyen los poros del disco, restaurando la permeabilidad del filtro. Esta limpieza permite mantener una tasa de filtración constante y reducir la humedad del queque de concentrado (Fuchs et al., 2023).

## **2.8 Modelamiento**

En ingeniería y ciencias aplicadas, un modelo se entiende como una representación abstracta, simplificada e idealizada de la realidad, construida con el objetivo de facilitar la comprensión, el análisis y la predicción del comportamiento de un sistema real. Los modelos permiten estudiar sistemas complejos sin necesidad de intervenir directamente sobre ellos, lo cual resulta especialmente útil cuando se trata de procesos costosos, peligrosos o difíciles de observar en su totalidad. A través de la modelación, se identifican relaciones entre variables clave, se establecen supuestos y se proyecta el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones.

Sterman (2000) define un modelo como "una representación simplificada de un sistema o fenómeno que ayuda a explicarlo, predecirlo o controlarlo". Desde esta perspectiva, los modelos no buscan replicar cada detalle del sistema real, sino captar sus dinámicas esenciales.

Respecto al modelo predictivo es un tipo específico de modelo analítico que se utiliza para anticipar el comportamiento futuro de una variable de interés, a partir de datos históricos o actuales. Estos modelos se basan en técnicas de estadística, aprendizaje automático y minería de datos, y se construyen mediante algoritmos que identifican patrones o relaciones entre variables independientes (predictoras) y una variable dependiente (a predecir).

Shmueli (2010) diferencia los modelos explicativos de los predictivos, señalando que mientras los primeros se centran en entender las relaciones causales entre variables, los segundos tienen como objetivo principal predecir con precisión el valor de una variable bajo nuevas condiciones. En el caso de la presente investigación, el modelo predictivo

desarrollado permite estimar la humedad residual del queque de concentrado de hierro en función de variables como el porcentaje de malla -325, la ley de azufre en la alimentación, la densidad de pulpa, el estado del transductor, entre otras (todas estas variables pertenecen a PPT). Este tipo de modelos es fundamental en entornos industriales, ya que proporciona una herramienta cuantitativa para anticiparse a desviaciones de parámetros críticos (como la humedad del queque de concentrado).

### **3 CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA**

#### **3.1 Desarrollo Experimental**

A continuación, se detallarán los pasos a realizados para la evaluación del aditivo biodegradable (Green Cleaning HP) en los filtros cerámicos de Puerto Punta Totalillo.

##### **3.1.1 Objetivo de la prueba**

El objetivo de la prueba fue evaluar el impacto del uso de un aditivo biodegradable sobre la eficiencia del proceso de filtración del concentrado de proveniente de PM, específicamente en la reducción de humedad y el control microbiológico, con el fin de optimizar la operación de los filtros cerámicos.

##### **3.1.2 Ubicación y condiciones operacionales**

Las pruebas se llevaron a cabo en terreno, en el Filtro N°1 y N°3 de la planta de filtrado ubicada en Puerto Punta Totalillo. Se operó bajo condiciones reales de producción, monitoreando parámetros como el pH del agua de proceso, estado de transductores y humedad del queque para asegurar trazabilidad y repetitividad.

##### **3.1.3 Procedimiento experimental**

###### **3.1.3.1 Establecimiento de línea base**

Se identificó el estado de los transductores y se determinó la cara (siendo estas la cara A para la cara izquierda y lado B para la cara derecha) y el disco específico para el monitoreo del filtro durante la prueba. También se registró la humedad del queque y las horas de uso de las placas filtrantes antes de aplicar el tratamiento. Como diferencia entre la prueba del Filtro N°1 y Filtro N°3, en el Filtro N°3 se seleccionaron 2 discos que tuvieran un estado de transductores defectuosos y en el Filtro N°1 se seleccionó 1 disco con estado de transductor bueno, uno con transductor regular y otro con transductor malo.

###### **3.1.3.2 Preparación del sistema**

Se realizó un enjuague completo del sistema para eliminar residuos químicos previos y evitar contaminación cruzada. Asimismo, se verificó que el pH del agua estuviera dentro del rango recomendado ( $>7$ ) para asegurar las condiciones adecuadas para la acción del aditivo.

### **3.1.3.3 Aplicación del aditivo**

Se dosificó en el Filtro N°3 el producto Green Cleaning HP en una concentración al 10%, equivalente a aproximadamente 2 contenedores por cuba de 18.000 L. Se incorporó primero el agua hasta llenar el 60% de la cuba y luego se incorporó el aditivo por 30 minutos hasta completar el 70% del nivel de cuba ya que de esta forma se aseguró cubrir la totalidad de los transductores. Luego se ejecutó un lavado continuo durante 2 horas con una velocidad de discos de 50 rpm, incluyendo el uso de ultrasonido en ciclos de 15 minutos para potenciar la limpieza.

Respecto al Filtro N°1 la diferencia en la aplicación del aditivo fue que se disminuyó en 30 minutos el tiempo de lavado, se lavó 1 hora a velocidad lenta de 40 rpm y 30 minutos a velocidad rápida de 90 rpm. El ultrasonido se realizó 2 veces solamente, 1 ultrasonido de 15 minutos a con velocidad lenta y otro ultrasonido de 15 minutos con velocidad rápida. Finalmente, como aplicación adicional del aditivo se utilizó una hidrolavadora con 2 L de aditivo para forzar la limpieza en los discos que tenían el mejor estado de transductores.

Como medida de control adicional para evitar una cantidad excesiva de espuma en piscina y así evitar un alto nivel de turbidez en el agua enviada a aguas CAP, en el Filtro N°1 se utilizó un antiespumante posterior al lavado donde se dejó aplicar por alrededor de 5 minutos para bajar el nivel de espuma residual en piscina.

### **3.1.3.4 Muestreo y monitoreo**

El operador tomó muestras del queque filtrado cada 4 horas, según directrices del proveedor, se midió el espesor del queque utilizando pie de metro, el análisis de humedad se ejecutó conforme al protocolo de laboratorio del puerto, se recolectaron cuatro muestras directamente desde los discos utilizando cepillos de dientes, con el fin de realizar el análisis microbiológico correspondiente y finalmente, se recolectaron cinco muestras de agua de 100 mL cada vez que se aplicó el aditivo, las que fueron enviadas para análisis microbiológicos a un laboratorio externo.

### **3.1.3.5 Control y seguimiento**

Se controló el estado de los activos involucrados y parámetros del pH previo al lavado con el aditivo, además de realizarle seguimiento tanto a la humedad resultante de las pruebas y los resultados microbiológicos posteriores a la intervención.

### **3.1.3.6 Variables consideradas**

- Variable independiente: Presencia del aditivo Green Cleaning HP.
- Variable dependiente: Humedad del queque, espesor del queque, cantidad de colonias bacterianas.
- Variables controladas: pH del agua, volumen y concentración del aditivo, tiempo de contacto y condiciones operacionales del filtro.

### **3.1.3.7 Indicadores de éxito**

El criterio principal de éxito fue alcanzar una humedad final del queque menor al 10%, junto con una reducción cuantificable en la población bacteriana del sistema, sin generar contaminación cruzada ni afectar negativamente la operación del filtro.

### **3.1.4 Equipos e instrumentos utilizados**

- Filtro cerámico Larox CC-144
- PHmetro digital
- Pie de metro
- Termobalanza Sartorius
- Cepillos de dientes
- Pala de muestreo
- Frasco para transportar la muestra

### **3.1.5 Muestreo**

El día 9 de abril de 2025 a las 9:00 horas se dio inicio a la prueba con el aditivo Green Cleaning HP en el Filtro N°3, decisión tomada en conjunto con el jefe de filtrado debido al estado en que se encontraban los transductores de dicho filtro. Se siguieron de forma estricta todos los pasos establecidos en el protocolo de pruebas. Primero, se tomaron muestras base de pH del agua de proceso y de humedad del queque. A continuación, se procedió a vaciar

completamente la cuba, se llenó nuevamente hasta un 60% de su capacidad con agua, y posteriormente se incorporó el aditivo Green Cleaning HP.

Una vez completada la carga del aditivo, se dio inicio al proceso de lavado, el cual tuvo una duración de 2 horas, aplicando ultrasonido en intervalos de 15 minutos. Considerando todas las etapas previas de preparación —como el vaciado y llenado de la cuba, la disposición de bombas, la toma de muestras iniciales y la logística general— el procedimiento completo tuvo una duración aproximada de 4 horas. A las 13:00 horas, se reanudó el funcionamiento del filtro tras el tratamiento con el aditivo.

La primera muestra posterior a la limpieza fue tomada a las 13:40 horas, seleccionando los discos 3 lado A y 6 lado B, los cuales habían mostrado previamente un bajo rendimiento en la formación de queque al tener valores de espesor de 4 [mm] y 1,3 [mm], además de humedades de 11,3% y 13,6% respectivamente. Debido a restricciones de tiempo, se tomó una segunda muestra ese mismo día a las 16:45 horas. Durante los días siguientes, se continuó con la toma de muestras, con un promedio de tres por día, excluyendo el fin de semana. La última muestra correspondiente a esta prueba fue recolectada el día 14 de abril a las 16:04 horas y respecto al estado de la piscina luego de la primera prueba con aditivo se mantuvo con una cantidad excesiva de espuma que se demoró aproximadamente 27 horas en desaparecer de la piscina.

Se dejó transcurrir una semana entre la prueba del Filtro N°3 y la del Filtro N°1 debido a que, durante la semana del 14 de abril, se envió ácido acético por el concentrado desde Planta Magnetita para así limpiar el ducto, lo que afectó temporalmente el desempeño de los filtros cerámicos al saturarlos. Para evitar interferencias en la prueba y no comprometer la producción, se decidió posponer la siguiente intervención.

El día 22 de abril a las 15:30 horas se dio inicio a la prueba en el Filtro N°1, repitiendo la toma de muestras de línea base (pH del agua y humedad del queque). En esta ocasión, se introdujeron modificaciones al protocolo inicial: se seleccionaron tres discos cerámicos con diferente condición operativa —el disco 2 A con transductor en mal estado, el disco 8 B con transductor en estado regular y el disco 5 A con transductor en buen estado— para evaluar el efecto del aditivo en distintos escenarios.

El procedimiento de limpieza se realizó utilizando exclusivamente el aditivo Green Cleaning, durante un periodo total de 1 hora y 30 minutos. En este tiempo además de lavar de forma convencional, se aplicaron 2 litros del aditivo mediante una hidrolavadora, dirigiendo el chorro directamente sobre los discos 5A y 8B para forzar una limpieza mecánica de estos. La aplicación se mantuvo durante 10 minutos continuos por disco, como parte del protocolo de evaluación del desempeño del aditivo en la remoción de material acumulado y su influencia en la eficiencia del filtrado, particularmente en la reducción de la humedad del queque., con el objetivo de potenciar la acción de la limpieza mecánica. Se variaron las revoluciones de los discos: durante la primera hora se operó a baja velocidad (40 rpm) y durante los últimos 30 minutos a alta velocidad (90 rpm). Se aplicó ultrasonido en ambas fases, durante 15 minutos por cada velocidad. Adicionalmente, al finalizar el lavado, se dosificó un antiespumante para evitar acumulación excesiva de espuma en la piscina, reduciendo súbitamente la cantidad de espuma en piscina y reduciendo a el tiempo de espuma en piscina a 16 horas aproximadamente.

Considerando todas las etapas de preparación, logística, limpieza y ajustes operativos, el filtro estuvo detenido por aproximadamente 4 horas y 30 minutos. A las 20:00 horas del mismo día se reanudó el funcionamiento del filtro y, de forma inmediata, se tomó la primera muestra post-lavado. Al igual que en la prueba anterior, se realizaron tres muestreos diarios, esta vez en un rango de tiempo más acotado, desde el 23 de abril hasta el 25 de abril, fecha en la que se tomó la última muestra a las 17:00 horas.

## **3.2 Modelo Metalúrgico de Proceso**

### **3.2.1 Definición del objetivo del modelo**

En primer lugar, se definió el objetivo principal del modelo: predecir la humedad final del queque generado por los filtros cerámicos de la planta de filtrado, con el fin de evaluar la operación diaria y tomar decisiones orientadas a cumplir con el KPI de humedad establecido (menor al 10%).

### **3.2.2 Selección de variables significativas**

A partir de la revisión técnica y la experiencia operacional, se seleccionaron aquellas variables que, por su influencia en el proceso, podrían tener mayor correlación con la

humedad del queque. Se excluyeron variables redundantes, mal registradas o con bajo aporte teórico al fenómeno.

### **3.2.3 Limpieza y validación de datos**

Se realizó un análisis exploratorio para identificar valores atípicos (outliers), registros incompletos o inconsistentes, aquellos datos que no representaban adecuadamente las condiciones operacionales típicas fueron filtrados para evitar sesgos en el modelo. Este paso incluyó la estandarización de unidades y formatos.

### **3.2.4 Separación de datos de entrenamiento y prueba**

Para validar la capacidad predictiva del modelo, se dividió la base de datos en dos conjuntos: un 80% de los registros fue utilizado para el entrenamiento del modelo (4.546 datos), y el 20% restante (1.136 datos) se reservó para la etapa de prueba. Esta división se realizó utilizando una asignación aleatoria con función aleatorio () en Excel.

### **3.2.5 Aplicación del modelo estadístico de regresión lineal múltiple**

Se utilizó el complemento “Análisis de datos” de Excel para aplicar una regresión lineal múltiple sobre los datos de entrenamiento. Esta técnica permitió identificar el peso de cada variable en la predicción de la humedad. Se obtuvieron los coeficientes, errores estándar, intervalos de confianza y valores p asociados a cada variable independiente.

### **3.2.6 Evaluación del modelo**

Con los coeficientes obtenidos, se construyó una ecuación predictiva de humedad. Luego, se aplicó esta ecuación sobre el conjunto de datos de prueba para comparar las predicciones contra los valores reales. Se calcularon métricas de validación como el coeficiente de determinación  $R^2$  para el conjunto de prueba, que alcanzó un valor de 0,82, lo que indicó una alta capacidad predictiva.

### **3.2.7 Implementación y validación del modelo final**

Finalmente, se construyó un modelo definitivo utilizando el 100% de los datos, obteniendo un  $R^2$  total de 0,83, el cual fue considerado representativo del comportamiento histórico del proceso. Este modelo puede ser utilizado como herramienta de análisis y apoyo a la toma de decisiones operacionales en la planta.

## 4 CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la presente sección se detallan y discuten los resultados obtenidos a partir de las pruebas de filtración con aditivo Green Cleaning HP aplicado en los filtros cerámicos pertenecientes a la línea de PM del Puerto Punta Totoralillo. Partiendo por los datos de humedad residual, espesor de queque, comportamiento de la espuma y rendimiento efectivo.

Se describirá primero la evolución temporal de la humedad del queque en cada filtro, para luego correlacionar estos valores con el espesor registrado, el resultado de la humedad residual del queque y la espuma observada en piscina. A continuación, se analizará el impacto sobre el rendimiento efectivo y se cuantificarán los costos asociados a las pruebas realizadas. Con base en lo anterior dicho, se identificarán las principales fortalezas y limitaciones del uso del aditivo. Además, se analizará el funcionamiento del modelo de regresión propuesto para estimar la humedad del queque y se evaluarán los aspectos económicos derivados de las pruebas realizadas por la empresa SNF.

En la Figura 4.1 se observó la evolución histórica de la humedad del queque registrada entre el 29 de diciembre de 2022 y el 06 de mayo de 2025 en Puerto Punta Totoralillo. Se realizó una depuración de la base de datos ignorando datos atípicos en el proceso como datos iguales a 0 o humedades inferiores al 7%. A partir del 29 de diciembre de 2022, la humedad del queque se situó en torno al 11 %. Durante el primer semestre de 2023, esta humedad se incrementó de forma paulatina, superando el 12 % hacia mediados de año y alcanzando valores entre 12 % y 14 % durante la segunda mitad de 2023. Hacia finales de 2023 y principios de 2024 se registraron los picos más elevados, rozando el 15 %. A partir de ese momento, la humedad experimentó un descenso continuo a lo largo de todo 2024, hasta estabilizarse alrededor del 11 %-12 % en los primeros meses de 2025.

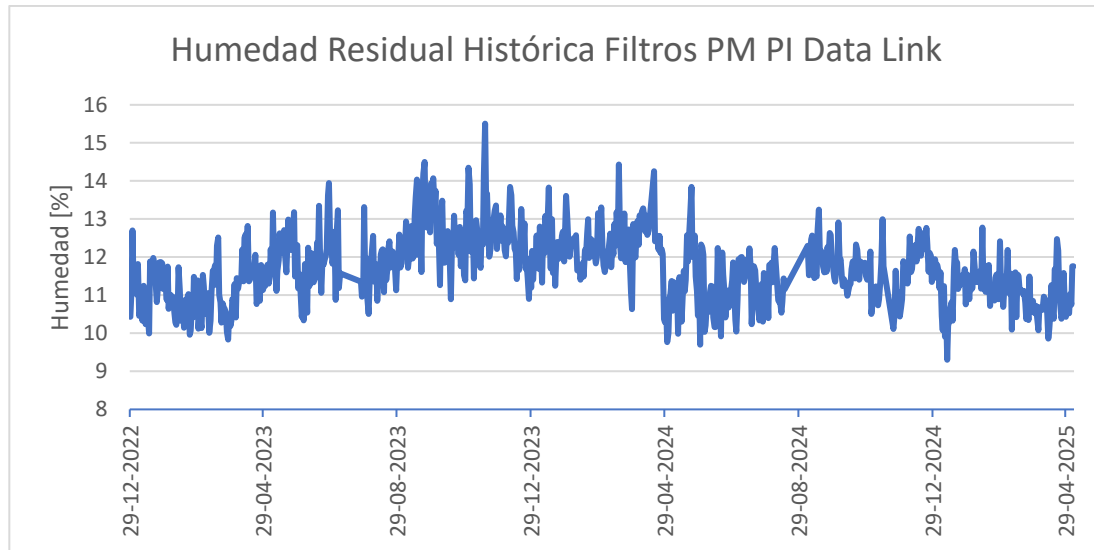


Figura 4.1 Humedad histórica de Puerto Punta Totoralillo, filtros línea PM (Elaboración Propia, 2025).

Este recorrido histórico constituyó la línea de base empleada para comparar los resultados de las pruebas con el aditivo Green Cleaning HP. Al comparar sobre esta serie las mediciones obtenidas en los filtros N°3 y N°1, se pudo determinar si las variaciones experimentales representaron desviaciones reales en el desempeño de la filtración o, por el contrario, se mantuvieron dentro de la variabilidad estacional y operativa previamente documentada.

En la Figura 4.2 que muestra la humedad previa y posterior al aditivo en el Filtro N°3, se observó que, durante el periodo de referencia (1 al 9 de abril de 2025, 1 semana completa previa a utilizar el aditivo), los valores de humedad del queque se mantuvieron estabilizados alrededor de un 10,7 % como promedio de línea base. Sin embargo, una vez iniciado el lavado con Green Cleaning HP al 10 % y la aplicación de ultrasonido cada 15 minutos durante dos horas, las lecturas de humedad experimentaron picos transitorios que llegaron a superar el 13 % los días 10 y 11 de abril, incrementando la media general a 11,27 % y, por tanto, elevándose 0,54 puntos porcentuales por encima del KPI establecido en 10 %. Este comportamiento contrastó con la hipótesis inicial de que el aditivo fomentaría una mejora en la limpieza de las placas y facilitaría la reducción de la humedad residual utilizando un reactivo más amigable al medio ambiente; por el contrario, los datos sugirieron que la limpieza al ser del tipo superficial y por sumergimiento de las placas en el aditivo, no limpió

los poros tal como se esperaba lo cual dificultó el flujo del filtrado. A su vez, se registró un episodio puntual entre la noche del 13 de abril y la madrugada del 14 de abril, en el cual la humedad descendió brevemente por debajo del 10 %, pero esta mejora se atribuyó a una condición que tiene este Filtro N°3 que es dinámico por lo que puede recibir tanto alimentación de PM como de CNN, al cambio de alimentación del concentrado (alimentación con material de malla 82,1 % – #325 proveniente de CNN) tras el cierre temporal del concentrado de PM, y no a un efecto directo del aditivo. Por último, el registro del espesor promedio de 3,62 mm en el disco 3A y 5,71 mm en el 6B observados en la Tabla 4.1 indicó que los queques de menor grosor también pudieron haber retenido más agua de lo esperado, reforzando la idea inicial de esta prueba que los transductores malos son el mayor problema al no realizar el ultrasonido correspondiente y por consiguiente no pudiendo limpiar las micropartículas incrustadas en el filtro cerámico. En conjunto, estos resultados llevaron a la conclusión de que, bajo las condiciones y el protocolo empleado en el Filtro N°3, Green Cleaning HP no logró reducir de forma sostenida la humedad residual del queque y que los únicos descensos que cumplieron el KPI respondieron a factores operativos externos más que a una mejora intrínseca de la eficiencia de filtración.

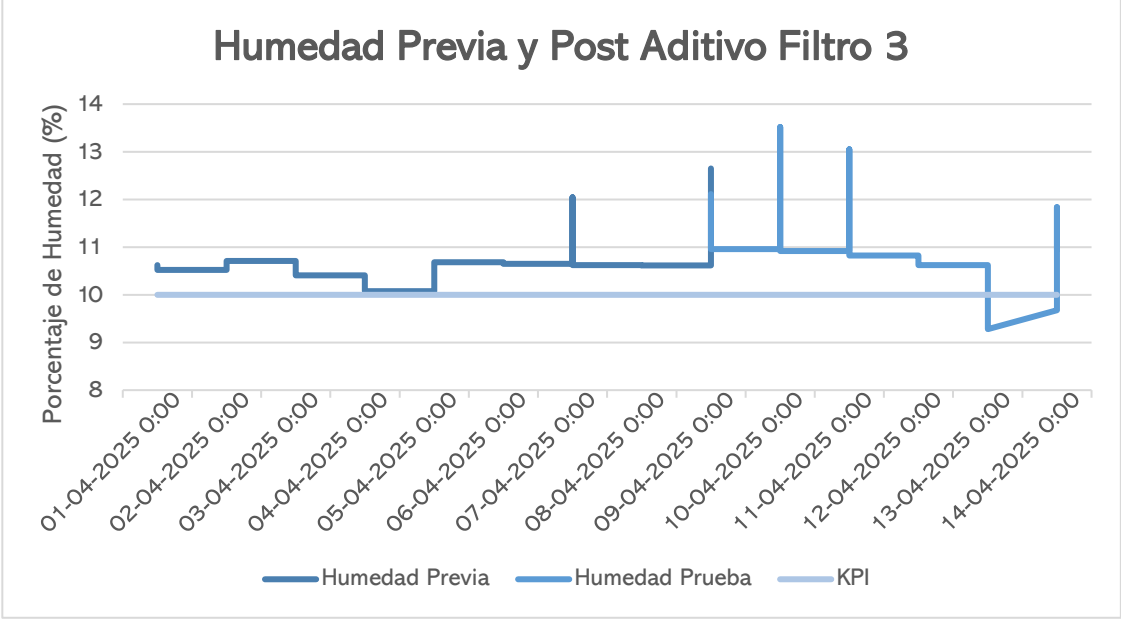


Figura 4.2 Prueba de humedad Filtro N°3 Puerto Punta Totalillo (Elaboración Propia, 2025).

Tabla 4.1 Espesor del queque y humedad promedio Filtro N°3.

Parámetros	2A	5A
Humedad (%)	11,55	12,06
Espesor (mm)	3,62	5,71

Durante el periodo de pruebas siguiente tal como se observa en la Figura 4.3, se evaluó el comportamiento de la humedad en el queque de concentrado de hierro filtrado por el Filtro N°1 antes y después de la adición del aditivo. El objetivo fue verificar si con las modificaciones realizadas a esta segunda prueba se lograba alcanzar el KPI operacional, que consistía en reducir la humedad residual por debajo del 10 %.

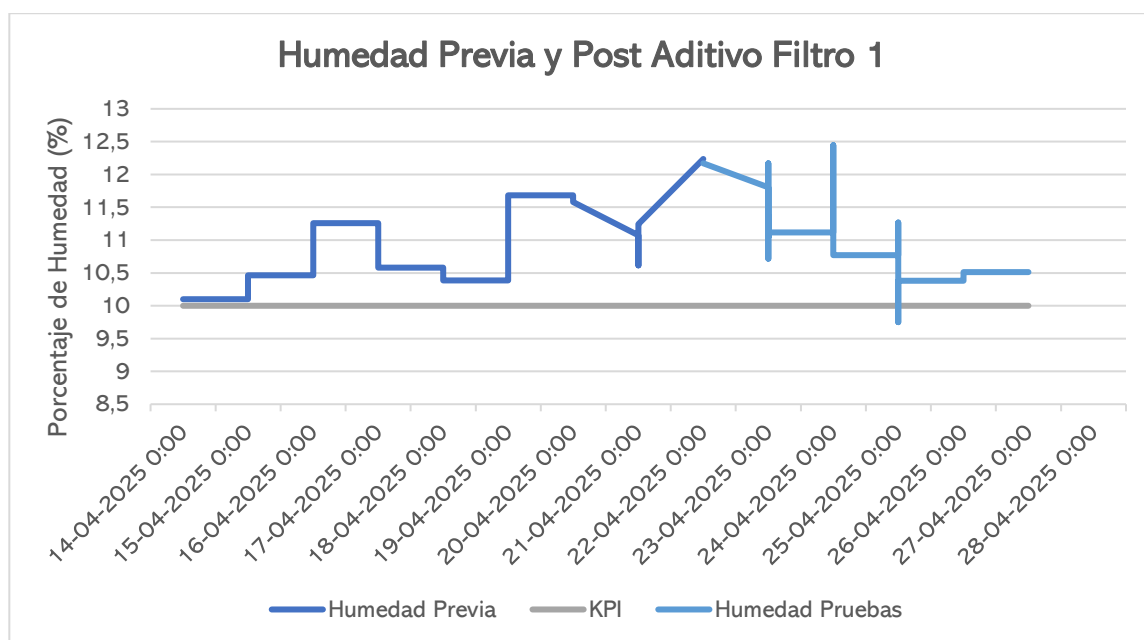


Figura 4.3 Prueba de humedad Filtro N°1 Puerto Punta Totoralillo (Elaboración Propia, 2025).

En el periodo previo al uso del aditivo, la humedad se mantuvo relativamente estable, con valores promedio cercanos a 10,5 %, presentando variaciones leves entre 10,1 % y

11,6 % según el día. Este comportamiento indicaba una eficiencia estándar del filtro, sin aditivos, pero aún por sobre el umbral deseado del KPI.

Tras la incorporación del aditivo, se registraron nuevos valores de humedad bajo distintas condiciones operacionales. El análisis de los datos posteriores mostró que, si bien existieron momentos donde la humedad alcanzó valores inferiores al 10 % —como el 25-04-2025 a las 13:30, donde se registraron valores de 9,23 % (2A) y 9,46 % (5A) —, estos no fueron representativos de una mejora sostenida en el tiempo. En promedio, la humedad posterior al uso del aditivo se mantuvo en torno a los 10,8 % a 11,2 %, lo que evidenció una mejora respecto a la primera prueba realizada, pero aún así la mejora fue puntual y no generalizada.

En resumen, la aplicación del aditivo no logró mantener de forma consistente la humedad por debajo del 10 %, por lo que no cumplió con el KPI definido para esta etapa del proceso. Si bien se observaron mejoras puntuales, estas no fueron suficientes para consolidarse como una solución efectiva.

Con base en los datos obtenidos sobre el espesor de torta y los promedios de humedad residual en los discos 2A, 5A y 8B tal como se ve en la Tabla 4.2, se puede realizar un análisis de la eficiencia del proceso de filtración cerámica en función del estado operativo de cada disco. El disco 5A, que se encontraba en excelente estado operativo y contaba con un transductor en funcionamiento óptimo, presenta no solo el menor espesor promedio de torta (7,1 mm), sino también la humedad más baja entre los tres discos (10,72%). Este comportamiento es coherente con la teoría de que un disco en buen estado, libre de obstrucciones y con buena permeabilidad, permite una filtración más eficiente, favoreciendo la extracción de líquido y, por tanto, obteniendo un queque con menor contenido de humedad.

Tabla 4.2 Espesor del queque y humedad promedio Filtro N°1. (Elaboración Propia, 2025).

Parámetros	2A	5A	8B
Humedad (%)	11,52	10,72	11,61
Espesor (mm)	6,20	7,44	8,68

En contraste, el disco 2A, cuyo transductor se encontraba en mal estado, muestra un espesor promedio menor (6,2 mm) pero una humedad residual más alta (11,52%). Esto sugiere que, si bien se forma una torta más delgada, la eficiencia del proceso de secado final se ve comprometida debido a la acumulación de sólidos finos o material biológico que obstruye los poros del disco, disminuyendo su capacidad de succión y retención de vacío, provocando que el queque adquiera una consistencia más líquida que sólida. Este fenómeno puede explicar por qué una torta más delgada no necesariamente conlleva a una menor humedad, si las condiciones del disco no permiten una evacuación eficiente del líquido.

Por su parte, el disco 8B, con un transductor en estado regular, muestra el mayor espesor de torta (9,4 mm) y también la mayor humedad residual (11,61%), lo cual evidencia una correlación directa entre el mal desempeño del transductor y la acumulación de sólidos en el medio filtrante. Un mayor espesor de torta puede indicar una menor frecuencia de desprendimiento del queque o una deficiente limpieza del disco, factores que reducen la capacidad del medio cerámico para ejercer su acción mecánica de succión.

Este análisis resalta la importancia del estado de los discos cerámicos y sus componentes auxiliares, como los transductores que producen el ultrasonido, en la eficiencia del proceso de filtración y en la obtención de un producto final con humedad controlada. Alcanzar una humedad inferior al KPI establecido (10%) no solo mejora el desempeño del proceso, sino que tiene un impacto directo en los costos operacionales. Además, si bien el objetivo operacional es disminuir la humedad lo máximo posible, para el transporte marítimo se exige que esta no sea superior al 8,4%, a fin de garantizar la estabilidad del material y evitar riesgos de licuefacción, lo cual representa una amenaza para la seguridad de la tripulación y puede provocar accidentes graves durante la navegación.

Ahora bien, durante la ejecución de las pruebas con aditivo aplicadas a los filtros cerámicos, se evidenció una diferencia notable en la cantidad de espuma generada en la piscina, lo cual quedó registrado en la Figura 4.4. En la piscina asociada al Filtro N°3 (imagen izquierda), donde no se aplicó antiespumante antes de evacuar el aditivo, se observó una acumulación significativa de espuma en la superficie.



Figura 4.4 Estado de piscina posterior al aditivo utilizado en el Filtro N°3 (izquierda) y Filtro N°1 (derecha).

En contraste, la imagen correspondiente al Filtro N°1 (imagen derecha), donde sí se dosificó un antiespumante previo a la evacuación del aditivo, muestra una superficie notoriamente más limpia y con mínima formación de espuma. Este resultado sugiere que la incorporación del antiespumante resultó efectiva para mitigar los efectos colaterales del uso del aditivo durante la limpieza de los discos.

Es importante destacar que el agua proveniente de estos procesos es recirculada hacia el sistema de Aguas CAP, lo que implica que la espuma generada también fue arrastrada hacia dicho circuito. Esta situación podría generar efectos indeseados en el sistema de tratamiento y recirculación, tales como interferencias en la planta desalinizadora debido a la presencia de agentes espumantes o alteraciones en los parámetros físicoquímicos del agua. Además, la acumulación de espuma puede impactar negativamente la operación de sensores, equipos hidráulicos o sistemas de decantación, e incluso representar un problema visual y operativo en zonas abiertas.

Respecto a los análisis de resultados de las bacterias en el Filtro N°3 que se observan en la Tabla 4.3 y en la Figura 4.5, se evidenció un patrón claro en la dinámica de reducción de la carga microbiana en las muestras del filtro cerámico tras el proceso de limpieza y desinfección con el aditivo Green Cleaning HP. La Tabla 4.3 evidenció que, en las muestras “Filtro 3 Disco 3-A Producción Antes” y “Filtro 3 Disco 6-B Producción Antes”, los recuentos de microorganismos alcanzaron niveles elevados, con valores de  $1,18 \times 10^4$

UFC/cm<sup>2</sup> y  $2,77 \times 10^4$  UFC/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Cambiando a las mediciones en células vivas, también se observaron recuentos significativos, de  $8,88 \times 10^4$  y  $9,13 \times 10^4$  en esas mismas muestras. Estos valores evidencian que, antes de cualquier proceso de desinfección, las superficies de los filtros presentaban una carga microbiana considerable.

Tras la realización del proceso de lavado con el aditivo, las muestras de “Post Enjuague/Lavado” mostraron una marcada disminución en la carga microbiana. Como ejemplo, la muestra “Filtro 3 Disco 3-A Post Enjuague/Lavado” reportó menos de 1 UFC/cm<sup>2</sup>, y un recuento de células vivas de  $3,21 \times 10^3$ , significativa en comparación con los niveles iniciales, lo cual indica que la etapa de lavado contribuyó a eliminar una parte sustancial de los microorganismos adheridos. En la muestra de “Post Desinfección” los recuentos de UFC alcanzaron valores aún menores, a menudo por debajo de la sensibilidad del método ( $<1$  UFC/cm<sup>2</sup>), y en las células vivas también descendieron a niveles mínimos – por ejemplo, en “Filtro 3 Disco 1-B Post Desinfección”, se encontró un recuento de  $2,00 \times 10^1$  células, muy por debajo de los valores iniciales, confirmando la eficacia del proceso. La tendencia se mantuvo en los valores de “Post Test”, donde las mediciones mostraron recuentos muy similares, cercanos a cero, en concordancia con los resultados microbiológicos del recuento de células vivas.

Tabla 4.3 Resultados de cuantificación de bacterias viables y recuento de bacterias aerobias mesófilas (Ecombio. 2025).

Muestras	UFC/cm <sup>2</sup> o mL	Células vivas/cm <sup>2</sup> o mL
Filtro 3 Disco 3-A Producción Antes	$1,18 \times 10^4$	$8,88 \times 10^4$
Filtro 3 Disco 6-B Producción Antes	$2,77 \times 10^4$	$9,13 \times 10^4$
Entrada Agua Filtro 3 (Muestra 3)	$<1$	$<1$
Entrada Agua Filtro 3 (Muestra 4)	$<1$	$<1$
Filtro 3 Disco 3-A Post Enjuague/Lavado	$<1$	$3,21 \times 10^3$
Filtro 3 Disco 6-B Post Enjuague/Lavado	$1,14 \times 10^4$	$7,83 \times 10^4$
Filtro 3 Disco 3-A Post Desinfección	$<1$	$<1$
Filtro 3 Disco 6-B Post Desinfección	$<1$	$<1$
Filtro 3 Disco 1-A Post Desinfección	$<1$	$<1$
Filtro 3 Disco 1-B Post Desinfección	$2,00 \times 10^1$	$<1$
Filtro 3 Disco 3-A Producción Post Desinfección	$5,10 \times 10^3$	$1,23 \times 10^4$
Filtro 3 Disco 6-B Producción Post Desinfección	$1,88 \times 10^4$	$5,56 \times 10^4$
Filtro 3 Disco 3-A Producción Post Test 16140	$3,70 \times 10^3$	$1,28 \times 10^4$

Filtro 3 Disco 6-B Producción Post Test 16140	3,10 x10 <sup>3</sup>	7,43 x10 <sup>3</sup>
---	-----------------------	-----------------------

El análisis visual del gráfico de recuento microbiológico (Figura 4.5), reflejó claramente la tendencia de reducción. En las barras que representaba los recuentos en escala logarítmica, se observó una caída consistente desde aproximadamente 4 en las muestras iniciales hasta valores inferiores a 1 en las muestras después del proceso. Además, en el gráfico de recuento de células vivas, la disminución fue igualmente marcada, reforzando que el aditivo logra remociones superiores a 3 unidades logarítmicas, lo que implica una reducción superior al 99,9% en la carga microbiana.

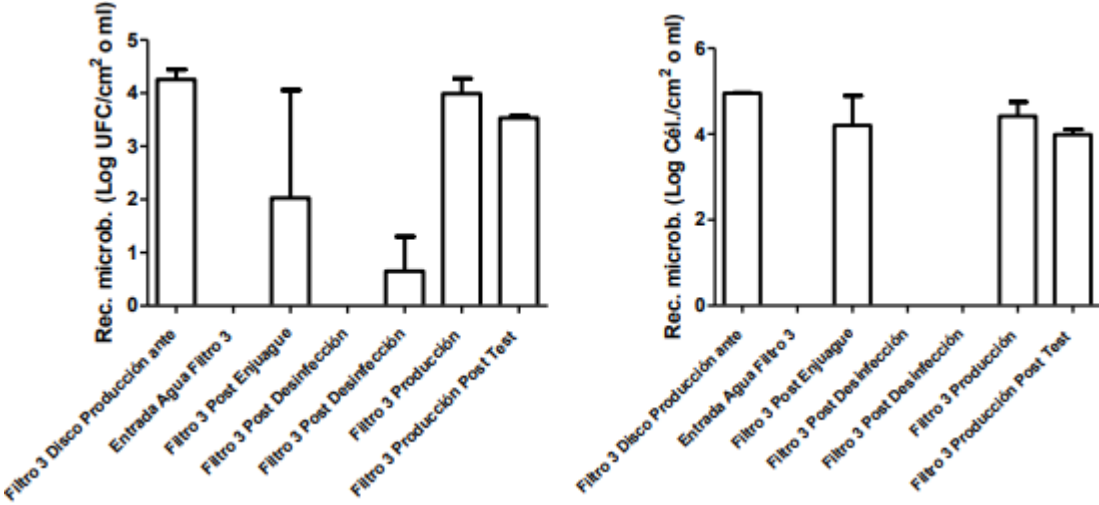


Figura 4.5 Recuento microbiológico de mesófilos aerobios (izquierda) y recuento de células vivas por microscopia de epifluorescencia (derecha) (Ecombio, 2025).

Respecto a los análisis de resultados de las bacterias en el Filtro N°1 que se pueden observar en la Tabla 4.4 y la Figura 4.6, los recuentos microbiológicos de las muestras de agua y las superficies de los filtros cerámicos mostraron una tendencia clara hacia la reducción significativa de la carga bacteriana tras la aplicación del proceso de desinfección con el aditivo. Específicamente en la Figura 4.6, se reflejó que tanto el recuento de microorganismos en unidades logarítmicas como la cuantificación de células vivas mediante microscopia de epifluorescencia indicaron una disminución notable en los niveles microbianos tras la desinfección. Por ejemplo, en los recuentos de aerobios mesófilos en las muestras “Pre-desinfección Filtro 1” se registraron valores cercanos a 4,5 y 4,8 unidades

logarítmicas en UFC/cm<sup>2</sup>, señalando una elevada presencia microbiana en esa etapa inicial. Sin embargo, después de la aplicación del producto y la posterior desinfección, en las muestras “Post desinfección Filtro 1” y “Post desinfección 1 hora de trabajo, Filtro 1”, estos valores cayeron por debajo de 1 en unidades logarítmicas, indicando que se lograron reducir las bacterias a niveles prácticamente indetectables mediante los métodos utilizados. La Tabla 4.4, respalda estos resultados, mostrando que las concentraciones de bacterias viables en UFC/cm<sup>2</sup> se redujeron de cifras del orden de 10<sup>3</sup>-10<sup>4</sup> a valores menores a 1, en muchos casos reportados como "<1", tras el proceso de desinfección. Además, el análisis de los recuentos de células vivas mediante microscopía fluorescente evidenció una disminución similar, confirmando la eficiencia del producto en eliminar la biomasa microbiana en las superficies de los filtros. Estos resultados, además, fueron coherentes con los análisis microbiológicos de las muestras de agua, en las cuales el recuento de bacterias también mostró reducciones drásticas tras la desinfección, consolidando la efectividad del proceso. En conclusión, los gráficos y tablas demostraron de manera inequívoca que el uso del aditivo fue efectivo en remoción y eliminación de bacterias tanto en muestras de agua como en superficies, alcanzando niveles microbiológicos que cumplen con estándares de desinfección y, por ende, garantizando mejoras en la reducción de carga microbiana presente.

Tabla 4.4 Resultados de cuantificación de bacterias viables y recuento de bacterias aerobias mesófilas (Ecombio, 2025).

Muestras	UFC/cm <sup>2</sup> o mL	Células vivas/cm <sup>2</sup> o mL
Pre-desinfección Disco 5-A Filtro 1	3,21 x 10 <sup>4</sup>	2,08 x 10 <sup>5</sup>
Pre-desinfección Disco 8-B Filtro 1	1,81 x 10 <sup>4</sup>	7,64 x 10 <sup>4</sup>
Entrada Agua M3	8,35 x 10 <sup>3</sup>	4,05 x 10 <sup>4</sup>
Entrada Agua M4	1,07 x 10 <sup>4</sup>	5,97 x 10 <sup>4</sup>
Post-desinfección Disco 5-A Filtro 1	<1	<1
Post-desinfección Disco 8-B Filtro 1	<1	<1
Post-desinfección 1 hora de trabajo, Disco 5-A Filtro 1	<1	<1
Post-desinfección 1 hora de trabajo, Disco 8-B Filtro 1	1,80 x 10 <sup>1</sup>	1,39 x 10 <sup>1</sup>

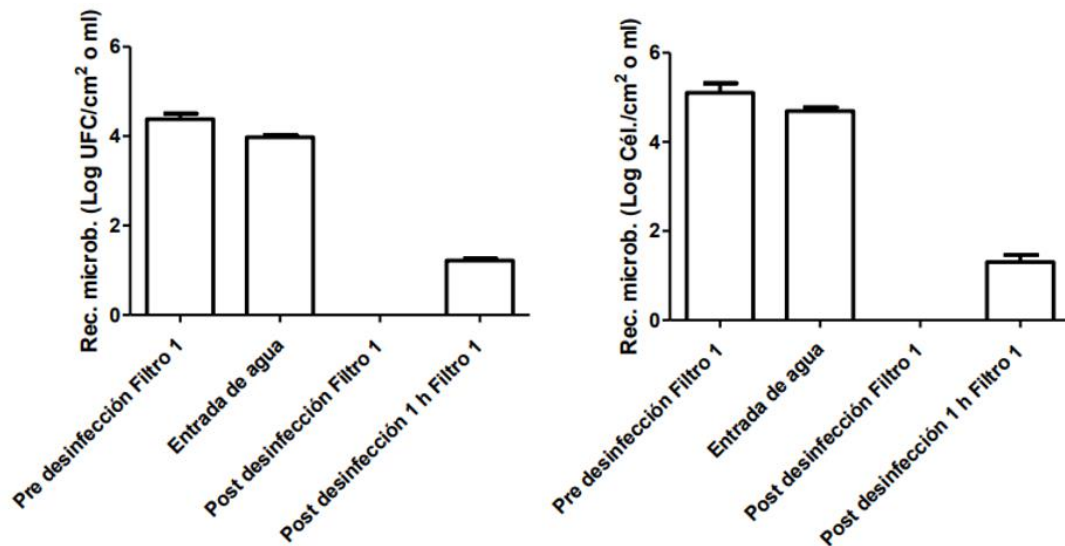


Figura 4.6 Recuento microbiológico de mesófilos aerobios (izquierda) y recuento de células vivas por microscopia de epifluorescencia (derecha) (Ecombio, 2025).

Uno de los aspectos clave evaluados durante las pruebas con el aditivo Green Cleaning fue el impacto económico asociado a su implementación, comparado con el método de limpieza tradicional mediante ácido nítrico. En condiciones normales de operación, la limpieza de los filtros cerámicos con ácido nítrico está debidamente planificada, con una duración estimada de 1 hora y 30 minutos, lo cual está considerado dentro del ciclo operativo de la planta. Esta intervención no representa una pérdida económica directa, ya que está contemplada dentro de la planificación productiva.

Sin embargo, durante la ejecución de las pruebas con el aditivo Green Cleaning, se evidenciaron demoras operacionales no previstas. En particular, los filtros N°3 y N°1 permanecieron fuera de servicio durante 2,5 y 3 horas adicionales, respectivamente, debido a ajustes logísticos, preparación del producto, y dificultades operativas durante su aplicación. Esta detención no programada generó una merma directa en la producción de concentrado de hierro, traduciéndose en pérdidas económicas significativas.

Tomando en cuenta un costo de producto por cuba de 17.860 US\$ y un rendimiento promedio de producción de 70 ton/h por filtro, se estimó una pérdida de 17.325 US\$ en el caso del filtro N°3 y 20.790 US\$ para el filtro N°1, con 2,5 y 3 horas de detención extra respectivamente. Estos valores reflejan que, si bien el aditivo cumple una a cabalidad uno de

los KPI que tiene relación con la limpieza de bacterias, la falta de planificación logística y tiempo improductivo asociado a su implementación puede generar costos no contemplados que son significativos.

Por tanto, se concluye que para que esta alternativa sea viable económicamente, debe evaluarse no solo su efectividad técnica, sino que también su integración operativa dentro del ciclo productivo, ajustando tiempos, planificación y recursos para evitar pérdidas productivas.

Respecto al análisis propiamente tal de las pruebas de laboratorio realizadas por SNF con el objetivo de reducir la humedad del queque de concentrado de hierro mediante el uso de aditivos químicos Flodri DA 470 (tensoactivo) y WSR 301 (no tensoactivo). Estas pruebas se llevaron a cabo bajo condiciones controladas, utilizando una pulpa con 74,3% de sólidos, una presión de vacío de -0,9 bar, un área de filtrado de laboratorio de 0,018 m<sup>2</sup> y un pH alcalino de 10,47. El tiempo de filtrado fue de 15 segundos, seguido de un secado de 20 segundos.

En el caso del aditivo Flodri DA 470 como se observa en la figura 4.7, los resultados evidenciaron una tendencia clara a la disminución de la humedad residual del queque a medida que aumentaba la dosificación. En la condición blanco (sin aditivo), la humedad fue de 11% y la tasa de filtrado alcanzó los 0,5 tph/m<sup>2</sup>. Con la incorporación de 200 gpt de Flodri DA 470, la humedad bajó a 10,16% y la tasa de filtrado aumentó a 0,57 tph/m<sup>2</sup>. Al aplicar 100 gpt, la humedad descendió aún más hasta 9,7%, y la tasa mejoró a 0,61 tph/m<sup>2</sup>. Finalmente, con 50 gpt, se obtuvo el mejor resultado, con una humedad de 9,6% y la mayor tasa de filtrado registrada, con 0,68 tph/m<sup>2</sup>. Estos resultados permitieron concluir que el Flodri DA 470 no solo mejoró la eficiencia del proceso de filtrado, sino que también permitió alcanzar niveles de humedad inferiores al umbral crítico del 10%, lo que representó una ventaja tanto operativa como económica para el proceso.

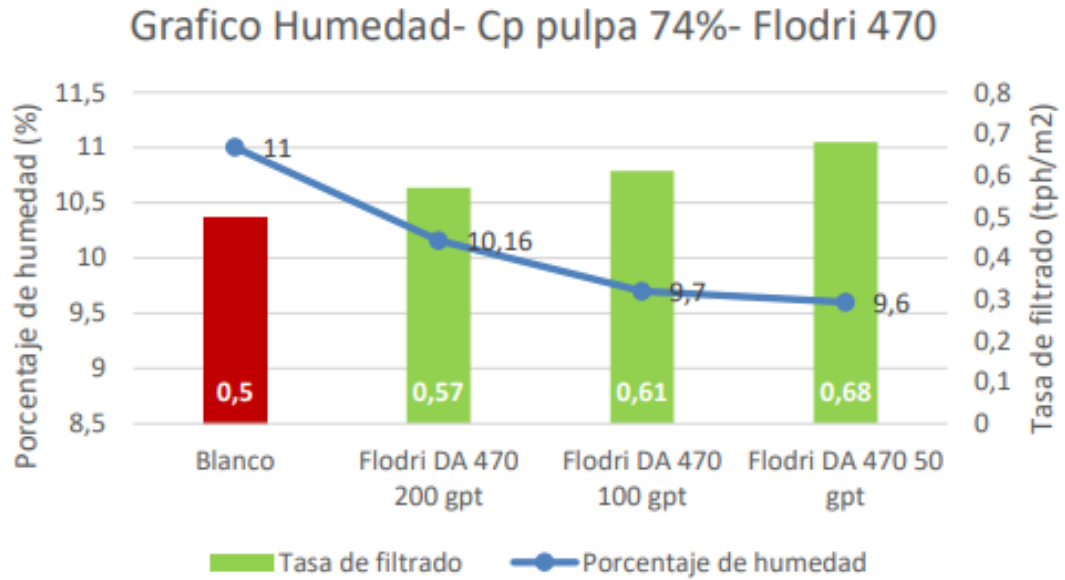


Figura 4.7 Prueba de dosificación con ayuda filtrado SNF Flodri DA 470 (SNF, 2025).

En contraste, los ensayos realizados con el aditivo WSR 301 como se puede observar en la Figura 4.8, no mostraron mejoras significativas. En la condición blanco, nuevamente se obtuvo una humedad de 11% con una tasa de filtrado de 0,51 tph/m<sup>2</sup>. Al aplicar 30 gpt de WSR 301, la humedad disminuyó levemente a 10,9%, sin cambios apreciables en la tasa. Con 20 gpt se logró una humedad de 10,12%, sin impacto en la tasa de filtración. A partir de menores dosificaciones (10, 5 y 3 gpt), la humedad no presentó variaciones relevantes, manteniéndose en torno a 11%, mientras que la tasa de filtrado se mantuvo constante. Este comportamiento indicó que el WSR 301 no generó un impacto significativo en la mejora del proceso de filtrado bajo las condiciones evaluadas, resultando una alternativa menos efectiva frente al Flodri DA 470.

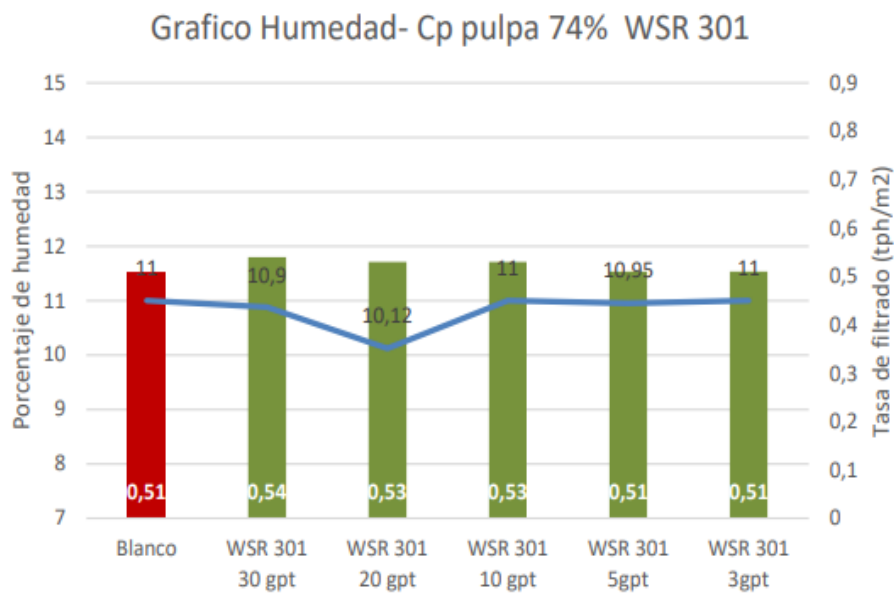


Figura 4.8 Prueba de dosificación con ayuda filtrado SNF WSR 301 (SNF, 2025).

Ahora bien, en relación a los ensayos realizados con la mezcla de ambos ayudas filtrados tal como se ve en la Figura 4.9, la humedad del queque evidenció una clara disminución al incorporar los aditivos. El ensayo blanco, sin aditivos, presentó la mayor humedad con un 11,4%. Al aplicar Flodri DA 470 junto con WSR 301 a 5 gpt, la humedad disminuyó a 10,6%; con 10 gpt de WSR 301, se redujo a 9,7%; y finalmente, con 20 gpt de WSR 301, se obtuvo la menor humedad: 9,1%. Esta reducción representa una mejora absoluta de 2,3 puntos porcentuales y una mejora relativa del 20,2% respecto al blanco, lo cual es un resultado significativo en procesos de filtración, considerando que una menor humedad implica menores costos de secado y transporte, así como mejor estabilidad del concentrado.

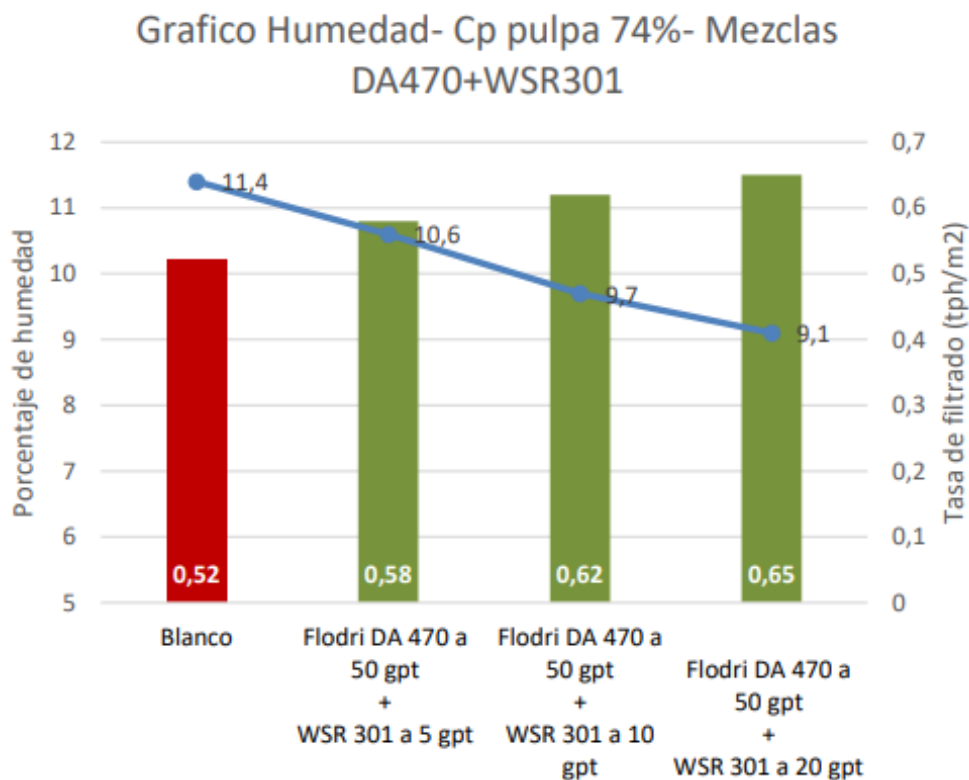


Figura 4.9 Prueba de dosificación con ayuda filtrado mezclas de ambos aditivos (SNF, 2025).

Por otro lado, la tasa de filtrado mostró una tendencia creciente a medida que se aumentaron las dosis de aditivos. El valor más bajo fue registrado en el ensayo blanco, con 0,52 tph/m<sup>2</sup>. Esta tasa aumentó a 0,58, 0,62 y finalmente a 0,65 tph/m<sup>2</sup> con el incremento progresivo de WSR 301, siempre en presencia de 50 gpt de Flodri DA 470. Este comportamiento refleja que, además de favorecer la deshidratación del queque, los aditivos también mejoran la eficiencia del proceso de filtrado, permitiendo un mayor caudal de sólido por unidad de tiempo y área. Esto podría atribuirse a la acción tensoactiva del Flodri DA 470, que facilita la formación de tortas más permeables, y al posible efecto sinérgico con el WSR 301, que optimiza la liberación del agua capilar.

En conclusión, bajo las condiciones experimentales utilizadas en estas pruebas de laboratorio, la combinación de Flodri DA 470 y WSR 301 no solo cumple con el objetivo de reducir significativamente la humedad del queque, sino que además mejora la tasa de filtrado. Esta doble mejora operativa posiciona a estos aditivos como una solución técnica viable para optimizar el rendimiento del filtro cerámico, especialmente en contextos donde no es posible

actuar sobre variables como temperatura o presión. Se recomienda continuar con validaciones en pruebas piloto para confirmar la reproducibilidad de estos beneficios a mayor escala.

Desde un enfoque económico, se debe considerar que estos productos tienen características y costos distintos tal como se puede observar en las Tablas 4.4 y 4.5 respectivamente: Flodri DA 470 es un tensoactivo líquido con un costo de 4,3 US\$/kg, mientras que WSR 301 es un aditivo sólido no tensoactivo con un costo unitario de 4,0 US\$/kg. La infraestructura necesaria para su dosificación también varía, con un costo de 5.900 US\$ para la planta de Flodri y de 7.200 US\$ para la planta de WSR. En las pruebas realizadas, la dosificación utilizada fue de 50 gpt para Flodri y 20 gpt para WSR 301, lo que se traduce en un consumo mensual de 7.500 kg para Flodri y 3.000 kg para WSR. Esto representa un costo mensual operativo de 32.250 US\$ para el primero y 12.000 US\$ para el segundo, costos que deben ser incorporados en el análisis como gastos fijos de operación.

Tabla 4.5 Costos generales de los aditivos asociados al consumo (Elaboración Propia, 2025).

Parámetros	SNF FLODRI DA 470 (Líquido)	SNF WSR 301 (Sólido)
Costo dosis [US\$/kg]	4,3	4,0
Planta dosificación [US\$]	5.900	7.200
Dosis [gpt]	50	20
Consumo 5 días [kg]	1.250	500
Consumo mensual [kg]	7.500	3.000
Costo mensual [US\$]	32.250	12.000

Tabla 4.6 Datos técnicos de referencia (Elaboración Propia, 2025).

Precio Fe [US\$/ton]	92
Costos Acum. PM [US\$/ton]	60
Horas mensuales [h]	720

Al revisar los resultados obtenidos a nivel de planta en la Tabla 4.6, se observa que la condición inicial, sin aditivos, arrojó una producción mensual de 151.575 toneladas, una tasa de filtrado de 0,52 tph/m<sup>2</sup> y una humedad promedio de 11%. Esta condición base generó un ingreso mensual de 4.698.825 US\$, que sirve como punto de comparación para las demás alternativas. En la condición con solo Flodri DA 470 a 50 gpt, se obtuvo la mayor producción mensual entre todas las opciones, alcanzando las 198.213 toneladas, lo que representa un incremento del 31% respecto al escenario inicial. Este aumento se ve reflejado también en la tasa de filtrado, que sube a 0,68 tph/m<sup>2</sup>, y en una reducción en la humedad hasta el 9,6%. El beneficio neto de producción adicional fue de 46.638 toneladas, lo que permitió generar ingresos mensuales por 6.342.831 US\$. Si se considera un costo inicial de 38.150 US\$ (infraestructura más puesta en marcha) y un costo mensual fijo de 32.250 US\$, esta alternativa generó un beneficio económico mensual neto de 1.460.181 US\$, siendo la opción con mayor rentabilidad directa en términos absolutos.

Tabla 4.7 Análisis económico de las propuestas (Elaboración Propia, 2025).

Parámetros	Inicial	SNF FLODRID DA 470 50 [gpt]	SNF WSR 301 20 [gpt]	Mezcla FLODRID DA 470 + WSR 301
Producción Mensual [t]	151.575	198.213	154.490	189.469
Variación [%]	-	31	2	25
Beneficio Neto Producción [t]	-	46.638	2.915	37.894
Tasa de filtrado [tph/m <sup>2</sup> ]	0,52	0,68	0,53	0,65
Ingreso Mensual [US\$]	4.698.825	6.342.831	4.943.677	6.063.000
Costo Total Inicial [US\$]	-	38.150	19.200	57.350
Costo Total Fijo [US\$]	-	32.250	12.000	44.250
Beneficios Producción Primer Mes [US\$]	-	1.422.031	62.077	1.111.000
Beneficios Producción Mensual [US\$]	-	1.460.181	81.277	1.168.350
Humedad [%]	11	9,6	10,12	9,1

En contraste, el uso exclusivo de WSR 301 a 20 gpt no entregó resultados tan favorables. La producción mensual solo aumentó a 154.490 toneladas, lo que representa una mejora del 2%, con una tasa de filtrado de 0,53 tph/m<sup>2</sup>, apenas superior al caso base. La humedad también se redujo, aunque en menor medida, alcanzando el 10,12%. El beneficio neto de producción adicional fue solo de 2.915 toneladas, y los ingresos mensuales obtenidos fueron de 4.943.677 US\$. Esta condición tuvo el menor costo total inicial (19.200 US\$) y el menor costo mensual (12.000 US\$), lo que le permitió generar un beneficio mensual de apenas 81.277 US\$. Esto indica que, aunque es una opción de bajo costo de implementación, no representa una mejora significativa ni en lo técnico ni en lo económico, por lo que su aplicación no se justificaría desde una perspectiva costo-beneficio.

La tercera condición evaluada, que consistió en la combinación de ambos aditivos (Flodri DA 470 a 50 gpt y WSR 301 a 20 gpt), presentó un balance técnico-económico más equilibrado y competitivo. En este caso, la producción mensual fue de 189.469 toneladas, representando una mejora del 25% frente a la condición inicial. La tasa de filtrado alcanzó los 0,65 tph/m<sup>2</sup> y se logró la menor humedad del queque: 9,1%, lo cual es relevante no solo por los beneficios operacionales (reducción en costos de secado y transporte), sino también por el valor comercial que puede adquirir un concentrado más seco y estable. Esta mejora se tradujo en un ingreso mensual de 6.063.000 US\$ y un beneficio neto de producción de 37.894 toneladas adicionales. Aunque esta alternativa implicó el mayor costo de inversión inicial (57.350 US\$, considerando ambas plantas dosificadoras) y un costo mensual combinado de 44.250 US\$, los beneficios compensan con creces esta inversión, generando una utilidad mensual estimada de 1.168.350 US\$.

Finalmente, con el objetivo de anticipar y controlar el comportamiento de la humedad del queque de concentrado de hierro generado en los filtros cerámicos Larox CC-144, se construyó un modelo de regresión múltiple lineal utilizando una base de datos histórica compuesta por 5.682 registros operacionales recopilados durante un periodo de un año en Puerto Punta Totoralillo. La variable dependiente fue la humedad del queque, mientras que las variables independientes correspondieron a: porcentaje bajo malla -325, ley de azufre en la alimentación, porcentaje de sólidos en la alimentación diaria, posición de la rastra, torque y estado del transductor. Si bien torque y posición de rastra no son variables propias del filtro

cerámico, sino del proceso anterior de espesamiento, fueron incluidas en el modelo por su potencial influencia indirecta sobre las condiciones de entrada del filtro y, en consecuencia, sobre la humedad final.

Desde el punto de vista estadístico, el modelo mostró un excelente desempeño. El coeficiente de determinación  $R^2$  fue de 0,8337, validado con un  $R^2$  de prueba de 0,8362, lo que indica que más del 83% de la variabilidad de la humedad puede ser explicada por las variables incluidas. Este nivel de ajuste es altamente satisfactorio, especialmente considerando que se trata de un sistema industrial con múltiples fuentes de perturbación, y se enmarca dentro de los estándares aceptados por la literatura científica, que establece que un  $R^2$  superior al 80% representa un ajuste muy bueno en modelos aplicados a ingeniería de procesos (Montgomery et al., 2012; Kutner et al., 2005). El modelo también presentó una fuerte correlación global entre variables, con un coeficiente de correlación múltiple de 0,913 y un bajo error típico de 0,272, lo que refleja una adecuada precisión en la estimación de la variable objetivo

Desde la perspectiva operativa, el análisis de coeficientes reveló que la variable más influyente fue el estado del transductor, con un coeficiente negativo de -0,885. Este resultado tiene una base técnica clara, ya que el transductor es responsable de generar ondas ultrasónicas que permiten limpiar los poros de los discos cerámicos. Cuando esta limpieza es eficiente, se eliminan partículas finas acumuladas que de otro modo obstruirían los canales de paso, reduciendo la permeabilidad del medio filtrante y aumentando la retención de humedad. Por tanto, un transductor en buen estado contribuye directamente a una mayor eficiencia de secado, reduciendo significativamente la humedad del queque. En cuanto al torque y la posición de la rastra, si bien provienen del proceso anterior de espesamiento, mostraron también relación con la humedad: el torque tuvo un coeficiente positivo de 0,015, mientras que la posición de la rastra, con un coeficiente negativo de -0,007, no fue estadísticamente significativa. En este contexto, el torque puede interpretarse como un reflejo del comportamiento reológico de la pulpa, ya que un mayor torque en el espesador podría indicar condiciones de sobrecarga o alta concentración, que a su vez dificultan la filtración posterior. La posición de la rastra, al no ser significativa, sugiere que su efecto es probablemente indirecto o absorbido por otras variables.

El porcentaje de sólidos en la alimentación diaria presentó un coeficiente positivo de 0,009, lo cual indica que a mayores concentraciones de sólidos se produce, en promedio, una mayor humedad del queque. Este fenómeno puede explicarse por el aumento de viscosidad de la pulpa o una distribución de sólidos que favorece el colmatado superficial del disco filtrante. Asimismo, la ley de azufre en la alimentación tuvo un coeficiente positivo de 0,068, sugiriendo que minerales con mayor contenido de azufre, como sulfuros, tienden a retener más humedad, probablemente por su naturaleza más fina, comportamiento superficial más hidrofílico.

Una observación crítica del modelo corresponde al comportamiento del porcentaje bajo malla -325, que presentó un coeficiente negativo de -0,004, lo cual estadísticamente indicaría que un aumento en la proporción de finos reduce la humedad. Esta relación es contradictoria con lo observado operacionalmente, ya que una mayor presencia de partículas finas típicamente forma tortas más compactas, menos permeables y con mayor retención de humedad. Esta incongruencia puede explicarse por el hecho de que el modelo mide correlaciones, no causalidades. Es posible que en los periodos donde el contenido de finos fue alto también coincidieran condiciones operativas muy favorables —como buena limpieza de discos, transductores en buen estado o presión de vacío efectiva— que permitieron lograr una menor humedad pese a la granulometría adversa. Además, al tratarse de un modelo lineal, no se capturan efectos de umbral o no lineales, lo que podría ocultar el verdadero impacto del parámetro cuando se combina con otros factores.

Por lo cual se puede decir que el modelo planteado representa una herramienta estadística sólida y técnicamente coherente que permite anticipar los valores de humedad del queque con un alto grado de precisión y confiabilidad. Aporta información clave sobre los factores que realmente afectan el desempeño del proceso de filtración, destacando el rol central de la eficiencia de los transductores, el comportamiento de la pulpa proveniente del espesamiento, y las características del mineral alimentado. Su implementación práctica permitiría generar alertas tempranas, identificar condiciones de operación desfavorables y orientar mejoras tanto en el filtro como en etapas previas, avanzando hacia un control predictivo basado en datos históricos reales.

## 5 CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Este trabajo logró cumplir con el objetivo general de analizar el rendimiento de los filtros cerámicos Larox CC-144 de Puerto Punta Totoralillo, proponiendo alternativas viables para reducir la humedad del queque de concentrado de hierro proveniente de Planta Magnetita. A través de una combinación de análisis de parámetros operacionales, pruebas experimentales en laboratorio, evaluación económica y modelamiento predictivo, fue posible construir una visión integral del proceso de filtración. Los resultados obtenidos permiten concluir que existen múltiples variables que inciden sobre la humedad, algunas directamente relacionadas con la operación del filtro cerámico, y otras vinculadas a etapas previas como el espesamiento o la caracterización del mineral. Las conclusiones que se presentan a continuación responden específicamente a cada uno de los objetivos propuestos, aportando una base técnica para la mejora continua del proceso.

El análisis detallado de variables como el pH, la distribución granulométrica, el tiempo de filtrado, el estado de los discos cerámicos y otros parámetros operacionales permitió constatar que todos ellos afectan de forma significativa la humedad del queque. En particular, el pH de trabajo (10,47) se mantuvo dentro del rango adecuado para mantener la estabilidad superficial del mineral, pero se identificó que su ajuste hacia el punto isoeléctrico podría mejorar la eficiencia de filtración al modificar las fuerzas electrostáticas entre partículas y medios filtrantes. La granulometría del mineral alimentado, por su parte, mostró ser un factor determinante en la retención de humedad. En términos prácticos, se observó que un mayor contenido de partículas finas bajo malla -325 genera tortas más compactas y menos permeables, lo que reduce la velocidad de paso del líquido y, por ende, incrementa la humedad del queque. Esta observación técnica fue reforzada por los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas con el aditivo Green Cleaning, en las cuales se alimentó el filtro n.º 1 con material proveniente de CNN, cuya distribución granulométrica presentaba aproximadamente un 80% -#325. En dichas condiciones, se logró alcanzar humedades cercanas al 9%, lo cual representa una mejora notable respecto a las condiciones estándar de Planta Magnetita, donde el material contiene aproximadamente un 90% -#325 y genera humedades más elevadas. Estos resultados empíricos corroboran que una menor

proporción de finos favorece la formación de una torta más permeable y un secado más efectivo.

Sin embargo, es importante señalar que, pese a esta evidencia técnica, el modelo estadístico desarrollado arrojó una relación negativa entre el porcentaje de finos y la humedad, lo que implica que estadísticamente, a mayor proporción de finos, se obtendría menor humedad. Esta aparente contradicción se explica por las limitaciones del modelo lineal, el cual evalúa el efecto aislado de cada variable manteniendo constantes las demás. Si, durante el periodo analizado, las condiciones con alto contenido de finos coincidieron con buenos estados de transductores, adecuados tiempos de secado o pH favorable, el modelo podría haber interpretado una correlación inversa, aunque la relación causal real sea la opuesta. Además, la naturaleza no lineal de algunos fenómenos físicos, como el efecto de colmatación por finos, no puede ser completamente capturada por un modelo lineal clásico, lo que justifica la necesidad de complementar el análisis estadístico con una evaluación técnico-operacional basada en pruebas en terreno. Por otro lado, la duración del ciclo de filtrado y el secado posterior demostraron tener efectos directos: a mayores tiempos de secado se reduce la humedad, pero también se afecta la capacidad de tratamiento del filtro, lo cual obliga a buscar un equilibrio entre rendimiento y eficiencia. Finalmente, el estado físico y limpieza de los discos cerámicos resultó ser una condición necesaria para mantener la capacidad de paso de líquido y evitar aumentos no controlados en la humedad del producto.

El estado y funcionamiento de los transductores, responsables de la limpieza por ultrasonido de los discos cerámicos, se identificó como uno de los factores más determinantes del proceso. A través del análisis técnico y del modelo predictivo, se comprobó que la eficiencia de los transductores incide directamente sobre la humedad final del queque. Cuando estos dispositivos operan correctamente, logran remover las partículas finas que obstruyen los microporos de los discos cerámicos, permitiendo mantener la permeabilidad del medio filtrante y favoreciendo el drenaje del líquido. Por el contrario, fallas en los transductores, ya sea por desalineamiento o mal funcionamiento, provocan acumulación de material fino, disminución del paso de aire y aumento sostenido de la humedad, aun cuando la presión de vacío y los tiempos de filtrado se mantengan constantes. Esto se reflejó en el modelo, donde el estado del transductor fue la variable con mayor impacto cuantitativo sobre

la humedad, con un coeficiente negativo de gran magnitud y altísima significancia estadística. Este resultado refuerza la necesidad de implementar controles periódicos y sistemas de diagnóstico para garantizar su correcto desempeño. Además, pone en evidencia que incluso tecnologías aparentemente auxiliares, como el ultrasonido, pueden ser claves para asegurar la estabilidad del proceso y la calidad del producto final.

Desde el punto de vista económico, se concluyó que existen soluciones de bajo costo y alto impacto que pueden aplicarse para reducir la humedad del queque, destacándose el uso de aditivos químicos como Flodri DA 470 (tensoactivo) y WSR 301 (no tensoactivo). Las pruebas realizadas por SNF bajo condiciones controladas mostraron que, al aumentar la dosis de WSR 301, la humedad se redujo progresivamente desde un valor de referencia de 11,4% hasta 9,1%, lo que representa una mejora significativa. En paralelo, el uso de Flodri DA 470 permitió aumentar la tasa de filtrado, mejorando la productividad del sistema. El análisis económico arrojó que, pese al costo adicional asociado a la compra de aditivos, el beneficio en términos de mayor tonelaje procesado y menor pérdida de valor por penalización de humedad supera ampliamente el gasto. También se concluyó que mantener los transductores en óptimas condiciones tiene un excelente retorno económico, ya que su buen funcionamiento permite reducir la humedad sin necesidad de aumentar el tiempo de ciclo ni la inversión en infraestructura. Por lo tanto, las soluciones propuestas no solo son técnicamente viables, sino que además representan mejoras costo-eficientes que pueden implementarse en el corto plazo con resultados positivos sostenibles en el tiempo.

La implementación del aditivo Green Cleaning HP en el proceso de filtrado mediante filtros cerámicos ha permitido evaluar su eficacia en dos aspectos críticos: la limpieza de placas cerámicas y la reducción de carga microbiológica en los poros de los discos. A partir de las pruebas realizadas en los filtros N°1 y N°3, se pudo constatar que el aditivo actúa como un agente efectivo para remover la carga bacteriana acumulada, evidenciando una mejora en las condiciones sanitarias internas del sistema de filtración.

Durante el desarrollo experimental, se sostenía la hipótesis de que la presencia de bacterias en los poros cerámicos era uno de los factores responsables del aumento de humedad en el queque de concentrado de hierro. Sin embargo, tras la aplicación del aditivo y la evaluación comparativa de los resultados, se concluyó que, si bien el producto limpia y reduce la carga

microbiológica de forma efectiva, dicha carga no representa un factor determinante en el incremento de la humedad final. En cambio, variables como la distribución granulométrica del concentrado, el estado operativo de los discos cerámicos y las fallas en los transductores de ultrasonido demostraron tener un impacto significativamente mayor en la humedad residual. Por lo que, el aditivo Green Cleaning HP cumple su función como agente de limpieza microbiológica, asegurando un entorno más higiénico dentro de los poros cerámicos y previniendo la acumulación de biopelículas. Sin embargo, no representa una solución directa al problema de la alta humedad del queque, cuyo origen principal está relacionado con factores físicos y mecánicos del proceso, por ello su uso debe ser concebido como una herramienta complementaria dentro de la limpieza de los filtros cerámicos y no una opción que reemplace el ácido nítrico.

Finalmente, el desarrollo de un modelo predictivo de humedad utilizando regresión múltiple lineal permitió sintetizar el conocimiento acumulado a partir de los datos operacionales, identificando las principales variables que explican la variabilidad del proceso. El modelo fue construido a partir de 5.682 datos reales recolectados durante un año completo y presentó un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,83, considerado excelente en estudios de procesos industriales, según la literatura especializada. Se identificó que el estado del transductor, el torque del espesador, el porcentaje de sólidos en la alimentación y la ley de azufre fueron las variables más relevantes. A pesar de que el torque y la rastra no son parámetros del filtro cerámico, su inclusión en el modelo se justificó por su influencia indirecta sobre la concentración y el comportamiento de la pulpa al ingresar al filtro. El modelo, validado estadísticamente, permite anticipar escenarios de alta humedad y sugiere qué variables deben ser monitoreadas o ajustadas para corregir desviaciones. Aun cuando se presentaron algunas inconsistencias (relación inversa entre contenido de finos y humedad) estas fueron explicadas desde la interacción multivariable y la limitación del modelo lineal. En conjunto, esta herramienta representa un paso importante hacia el uso de analítica avanzada en operaciones mineras, con posibilidades futuras de implementación en sistemas de control predictivo y optimización automática del proceso de filtración.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

Caudillo C. (2023). Uso del Potencial Zeta en la Caracterización de Superficies de Adsorbentes (MS-Nx-Fe). Universidad de Guanajuato. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/download/3948/3431/12948>

Cap. (s. f.). Operaciones - CAP S.A. principal grupo minero siderúrgico de Chile. CAP S.A. Principal Grupo Minero Siderúrgico de Chile. <https://www.cap.cl/negocios/cap-mineria/>

Carlson, J., & Kawatra, S. K. (2011). Factors affecting zeta potential of iron oxides. *Minerals & Metallurgical Processing*, 28(1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/BF03402267>

Concha, F. (2001). Manual de Filtración y Separación. [https://www.researchgate.net/publication/276409073\\_Manual\\_de\\_Filtracion\\_y\\_Separacion](https://www.researchgate.net/publication/276409073_Manual_de_Filtracion_y_Separacion)

Coulson, J. & Richardson, J. (2002). *Chemical Engineering, Volume 2, 5th Edition, Particle Technology and Separation Processes*. Oxford: Butterworth-Heinemann. <https://dl.icdst.org/pdfs/files1/3fab215afb2753edb4091d6b6bc02550.pdf>

CONPAX. (2014). Construcción y Montaje Planta de Filtrado Puerto Punta Totoralillo. <https://www.conpax.cl/proyectos/planta-filtrado-totalillo/>

Eisele, T. C. (2005). Dewatering of iron ore concentrate. *International Journal of Mineral Processing*, 76(1–2), 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.11.007>

Fernández R. (2024). Países líderes en la producción de mineral de hierro a nivel mundial 2023. <https://es.statista.com/estadisticas/600165/paises-lideres-en-la-produccion-de-mineral-de-hierro-a-nivel-mundial/>

Forbes, D. (2011). Theory of Flocculation. WET USA Inc. [https://www.academia.edu/39132150/Theory\\_of\\_Flocculation](https://www.academia.edu/39132150/Theory_of_Flocculation)

Fuchs, F., & Kramlick, J. (2023). Ultrasonic cleaning. En Elsevier eBooks (pp. 455-471). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820254-8.00019-1>

Görres, G. & Hindström, R. (2007). Some Experiences with Modern Dewatering Technologies in Fine Iron Ore Application. <https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/iron-ore-2007/some-experiences-with-modern-dewatering-technologies-in-fine-iron-ore-application/>

Hampton, J. H. D., Savage, S. B., & Drew, R. A. L. (1992). Experimental Analysis of Fine-Particle Migration during Ceramic Filtration Processes. *Journal Of The American Ceramic Society*, 75(10), 2726-2732. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1992.tb05496.x>

Haselhuhn, H., Swanson, K. & Kwaatra, S. (2012). The Effect of CO<sub>2</sub> Sparging on the Flocculation and Filtration Rate of Concentrated Hamatite Slurries. *International Journal of Mineral Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.04.006>

IRONEXPERT. (2024). Minerales de hierro más importantes - IRONEXPERT. <https://www.ironexpert.cl/minerales-de-hierro>

Jaganmohan M. (2024) Iron mine production in Chile 2010-2022. <https://www.statista.com/statistics/760524/iron-production-chile/>

Jaganmohan M. (2025). Global iron ore reserves 2010-2024. Statista. Recuperado 8 de abril de 2025, de <https://www-statista-com.translate.goog/statistics/1168572/global-reserves-of-iron-ore/>

Komline-Sanderson, (2014). Komline-Sanderson Rotary Drum Vacuum Filters. [http://www.komline.com/docs/rotary\\_drum\\_vacuum\\_filter.html](http://www.komline.com/docs/rotary_drum_vacuum_filter.html)

Kosmulski, M. (2009). Surface charging and points of zero charge. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420051896>

Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied Linear Statistical Models* (5th ed.). McGraw-Hill Education

Lenntech, (1998). Water treatment solutions Lenntech. <http://www.lenntech.com/library/clarification/clarification/centrifugation.html>

Li, Y., & Huang, G. (2013). Zeta potential and surface charge density of mineral particles as a function of pH: A case of magnetite. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 34(5), 682–689. <https://doi.org/10.1080/01932691.2012.694855>

Liu, J., Zhao, D., & Barnett, M. O. (2011). Determination of surface charge properties of magnetite nanoparticles in aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1–3), 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.047>

Mänttari, M., Nyström, M. & Ekberg, B. (1995). Influence of Flocculants on the Performance of Flocculants on the Performance of a Ceramic Capillary Filter. *Minerals Engineering*, 28 November 1995, pp. 419-428.

Mineral Commodity Summaries. (2022). Iron Ores. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-iron-ore>

Montero, J. (2012). SELECCIÓN DE LA UNIDAD DE SEPARACIÓN MECÁNICA SÓLIDO – LÍQUIDO PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS PROCEDENTES DEL DESARENADO DE LOS SEPARADORES DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO. Repositorio Digital - EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4833/1/CD-4426.pdf>

Moss, M. & Dymond, B. (1978). Flocculation Theory and Application, *Mine and Quarry Journal*. <https://doi.org/10.1007/BF03402741>

Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis* (5th ed.). Wiley.

Pirkonen, P., Grönroos, J., Heikkinen, J. & Ekberg, B., (2010). Ultrasound Assisted Cleaning of Ceramic Capillary Filter. *Ultrasonics Sonochemistry* <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350417709001801>

Quast, K. (2018). A review on the characterisation and processing of oolitic iron ores. *Minerals Engineering*, 126, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.018>

Ramírez J. (2009). Tesis filtro cerámico LAROX-45-121. Universidad Nacional de Ingeniería Lima. <https://es.scribd.com/document/510431389/Tesis-Filtro-Ceramico-LAROX-45-121>

Rivera, J. (2004). Determinación de las Características de Filtración de una Pulpa de Concentrado de Plomo en un Filtro Cerámico Minipiloto. Universidad Nacional de Ingeniería Lima. <https://es.scribd.com/document/390514146/filtracion-cuca-pdf>

Ruth, M. (2004). Steel Production and Energy. En Elsevier eBooks (pp. 695-706). <https://doi.org/10.1016/b0-12-176480-x/00371-5>

Salmimies, R.; Kallas, J.; Ekberg, B.; Görres, G.; Andreassen, J. P.; Häkkinen, A.; Beck, R. (2013). The Scaling and Regeneration of Ceramic Filter Medium Used in the Dewatering of Magnetite Concentrate. International Journal of Mineral Processing. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.12.006>

Sinnott, R. K. (1993). Coulson & Richardson's CHEMICAL ENGINEERING, Volume 6, second Edition, Chemical Engineering Design. Oxford: Butterworth-Heinemann. <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/53185/1/Coulson%20%26%20Richardson's%20Chemical%20Engineering%2C%20vol1%206.pdf>

Trading Economics. (s. f.). Iron ore - price - chart - historical data - news. <https://tradingeconomics.com/commodity/iron-ore>

Wills, B. A. (1997). Mineral Processing Technology, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Sixth Edition. Great Britain: Butterworth-Heinemann. [https://www.academia.edu/40297760/Mineral\\_Processing\\_Technology\\_An\\_Introduction\\_to\\_the\\_Practical\\_Aspects\\_of\\_Ore\\_Treatment\\_and\\_Mineral\\_Recovery\\_by\\_Barry\\_A\\_Wills\\_Tim\\_Napier\\_Munn](https://www.academia.edu/40297760/Mineral_Processing_Technology_An_Introduction_to_the_Practical_Aspects_of_Ore_Treatment_and_Mineral_Recovery_by_Barry_A_Wills_Tim_Napier_Munn)

## 7 ANEXOS

### 7.1 ANEXO A

Tabla 7.1 Valores registrados de las pruebas con el aditivo Green Cleaning en el Filtro N°3 (Elaboración Propia, 2025).

	Disco 3A	Disco 6B
Fecha	Espesor [mm]	Espesor [mm]
09-04-2025	1,1	0,5
09-04-2025	4,5	7,5
10-04-2025	3,4	3,4
10-04-2025	3,9	3,4
11-04-2025	5,2	7,2
11-04-2025	4,8	6,8
11-04-2025	5	3,5
14-04-2025	4	9,1
14-04-2025	2,5	8,7
14-04-2025	1,8	7
Espesor Medio	3,6	5,7
Humedad Media	11,6	12,1

Tabla 7.2 Valores registrados de las pruebas con el aditivo Green Cleaning en el Filtro N°1 (Elaboración Propia 2025).

	Disco 2A	Disco 5A	Disco 8B
Fecha	Espesor [mm]	Espesor [mm]	Espesor [mm]
22-04-2025	4,7	8,2	10,8
22-04-2025	4	6	7,4
23-04-2025	3,8	4,1	9,7
23-04-2025	10,1	9,9	9,7
24-04-2025	4,7	5,6	9,8
24-04-2025	6,8	7,9	11,7
24-04-2025	7,2	6,3	9,1
25-04-2025	9,8	8,6	9,8
25-04-2025	4,7	7,4	7
Promedio	6,2	7,1	9,4
Humedad Media	11,5	10,7	11,6

## 7.2 ANEXO B

Tabla 7.3 Base de datos resumida registrada para el modelo predictivo (Elaboración Propia, 2025).

Fecha	Humedad	#-325	Ley Azufre Alim	%Sol Alim Dia	Posición Rastra	Torque	Estado Transductor
02-03-2025	11,49	88,00	0,25	74,80	3,17	10,92	2
26-02-2025	11,54	83,12	0,34	70,45	3,20	11,15	2
24-11-2024	10,11	92,48	0,32	70,50	2,83	10,07	3
02-05-2024	9,77	85,20	0,25	54,54	2,10	10,54	3
07-11-2024	11,23	88,44	0,33	72,52	3,09	14,50	2
03-03-2025	11,49	83,04	0,37	74,80	3,22	10,61	2
05-10-2024	12,91	87,08	0,95	75,57	2,76	16,24	1
14-12-2024	12,31	87,36	0,40	73,26	3,14	14,53	1
16-04-2025	11,26	87,96	0,47	74,47	2,96	10,36	2
07-08-2024	11,87	88,36	0,75	63,79	2,64	15,97	2
14-03-2025	11,21	82,80	0,46	68,66	3,26	10,39	2
23-11-2024	10,11	92,48	0,32	70,50	3,08	9,06	3
10-03-2025	11,02	83,68	0,51	74,76	2,93	10,73	2
21-05-2024	11,89	81,76	1,10	71,38	1,35	16,30	2
26-03-2025	10,91	86,24	0,21	65,34	2,56	9,65	3
20-10-2024	11,44	85,20	0,37	85,19	1,57	13,85	2
26-02-2025	11,54	83,12	0,34	70,45	3,31	12,19	2
13-12-2024	12,31	92,60	0,33	73,26	2,62	13,66	1
23-02-2025	10,88	85,64	0,32	74,39	1,82	11,08	3

25-09-2024	11,94	89,08	0,73	65,75	2,78	14,36	2
09-11-2024	10,84	86,08	0,09	72,04	2,85	13,73	3
12-02-2025	11,17	86,88	0,41	66,61	3,38	11,54	2
25-06-2024	10,74	86,44	0,57	73,84	2,07	14,54	3

Tabla 7.4 Estadísticas de la regresión (Elaboración Propia, 2025).

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,91
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,83
R <sup>2</sup> ajustado	0,83
Error típico	0,27
Observaciones	5682

Tabla 7.5 Análisis de varianza (Elaboración Propia, 2025).

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	12,753	0,156	81,667	0	12,447	13,060
#-325	-0,004	0,002	-2,436	0,015	-0,007	-0,001
Ley Azufre Alim	0,068	0,017	4,059	4,996x10 <sup>-5</sup>	0,035	0,101
%Sol Alim Dia	0,009	0,001	13,577	2,41x10 <sup>-41</sup>	0,007	0,010
Posición Rastra	-0,007	0,005	-1,398	0,162	-0,017	0,003
Torque	0,015	0,002	9,951	3,864x10 <sup>-23</sup>	0,012	0,0184
Estado Transductor	-0,885	0,006	-147,663	0	-0,897	-0,873

Obteniendo una ecuación con la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Humedad} = & 12,753 - (0,004 \cdot \# - 325) + (0,068 \cdot \text{Ley S Alim}) \\
 & + (0,009 \cdot \% \text{Sol Alim Dia}) - (0,007 \cdot \text{Posición Rastra}) \\
 & + (0,015 \cdot \text{Torque}) - (0,885 \cdot \text{Estado Transductor})
 \end{aligned}$$