



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

**Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Manresa**

Trabajo Fin de Máster

**Importancia de la recuperación de Agua
en la Minería del Uranio**

Maestría en Ingeniería de Recursos Naturales

Autor:

Arián Marcelo Avato

Director:

M.Dolors Grau Vilalta

SEPTIEMBRE 2016

Agradecimientos

A mi Directora por la paciencia y predisposición en todo momento.

Al programa de becas de formación en el exterior para profesionales en Ciencia y Tecnología del gobierno Argentina (BEC.AR) por la posibilidad que me han dado de realizar este Máster.

Al Gerente, a mi Jefe y mis compañeros de trabajo de la Gerencia Producción de Materias Primas (GPMP) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) de Argentina por la disponibilidad y darme acceso a la información requerida para realizar este trabajo.

A mi amigo e Ingeniero Franco Ferrucci de Argentina que me ha orientado en el uso de la herramienta Matlab® - Simulink®.

A mi Novia y Padres por el apoyo y la comprensión a pesar de la distancia.

A mi Hermana, amigos, compañeros de máster y demás becarios del programa BEC.AR por hacer de mi estancia en Barcelona de las mejores experiencias de mi vida.

Resumen

En el presente trabajo se estudia la recuperación del agua en la industria minera, específicamente en la minería del uranio. En primera instancia, se realiza un estudio del estado del arte con respecto al suministro, consumo, reutilización, gestión y tratamiento del agua en la industria minera. Continuando con el estudio del proceso de producción de concentrados de uranio a partir de minerales con el fin de comprender la participación del agua en los distintos procesos involucrados, así como también, de evaluar la generación y la calidad de sus aguas residuales.

Luego, mediante un caso de estudio real de un proyecto en desarrollo llevado adelante por la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) de Argentina, se aplican estos conceptos con el objetivo de estudiar el balance de agua de la futura instalación. Las fuentes de suministro externas y la capacidad de extracción de agua del ambiente en la zona son estudiados en base a un estudio realizado con anterioridad, con el objetivo de definir la máxima capacidad de extracción de agua disponible.

Un primer modelo del balance de agua es desarrollado en el entorno Matlab®-Simulink® en base a la memoria descriptiva del proceso. Este balance de agua es estudiado en profundidad con el fin de detectar sus puntos débiles, y se presentan propuestas de mejora con el fin de cumplir con los requerimientos de extracción máxima para el acuífero.

Se propone un nuevo sistema de distribución de las aguas para la instalación, agrupando las aguas en función de su calidad, y aumentando la recuperación del agua por el agregado de una etapa de tratamiento por Destilación con Membrana. En base a este nuevo balance de agua se desarrolla un segundo modelo con el cual se realiza un análisis de sensibilidad en función del factor de recuperación del proceso de Destilación por Membrana. El objetivo de este análisis es identificar la recuperación mínima que se debe exigir al proceso de Destilación por Membrana para cumplir con los requerimientos de extracción de agua del acuífero.

En forma adicional, se realiza un nuevo análisis de sensibilidad, eliminando del modelo el proceso de destilación por membrana, con el objetivo de estudiar cuanto hay que reducir la capacidad de procesamiento del mineral para que cumpla con los requisitos de extracción máxima del acuífero.

Finalmente, se plantea una propuesta final para el balance de agua de la instalación en la cual se logra mejor las condiciones del proceso original.

Abstract

In the present work water recovery is studied in mining industry, specifically in uranium mining. At first instance, the state of art of water supply, consumption, reuse, management and treatment in mining industry is study. Continued by the study of the uranium concentrates production process obtained from minerals, looking for understand the water behaviour in the different processes involved, as well as, to evaluate the generation and quality of its wastewater.

Then, a real case study for a development project carried out by the National Atomic Energy Commission (CNEA) of Argentina is used to applied theses concepts with the objective of studying the water balance of the future installation. External water supply and water extraction capacity from the environment in the area are studied based on a previously work, in order to define the maximum available water extraction capacity.

A first water balance model is developed in the Matlab®-Simulink® environment based on the specification of the production process. After that, this water balance is depth studied in order to identify their weaknesses, and improvements suggestions are submitted in order to meet the requirements of maximum extraction capacity of the aquifer.

A new water distribution system for the facility is proposed, organizing the waters streams in terms of quality, and increasing water recovery by the addition of a new water treatment step by Membrane Distillation. Based on this new water balance, a second model is developed and used for performed a sensitivity analysis study based on membrane distillation factor recovery. The objective of this analysis is to identify the minimum recovery should be required to membrane distillation process to meet the requirements of water extraction from the aquifer.

Additionally, a new sensitivity analysis study, erasing membrane distillation process from the model is performed in order to study the reduction of mineral process capacity for reach the maximum water extraction requirements.

Finally, an actual proposal for water balance facility is suggested, which improved the performance of the original water balance.

Objetivos

Objetivo General

El objetivo general de este Trabajo Final de Máster es estudiar la importancia que tiene la recuperación de agua en la Minería del Uranio, estudiando un caso real de un proyecto minero de uranio en desarrollo en Argentina. Se evaluará el efecto que tiene la recuperación del agua para el caso en estudio en función del suministro, consumo y gestión del agua en la instalación.

Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general se requerirá de cierto objetivos específicos que permitirán llegar a los resultados buscados:

- Analizar el estado del arte de la industria minera con respecto al suministro, consumo, gestión y tratamiento del agua en sus instalaciones.
- Identificar los procesos involucrados en una planta de producción de concentrados de uranio a partir de minerales de uranio y evaluar los problemas relacionados con sus aguas residuales.
- Estudiar el proceso planteado en el caso de estudio, con el fin de estimar los requerimientos de agua de la futura planta de procesamiento mediante el desarrollo del balance de agua de la instalación.
- Identificar las fuentes y estimar la capacidad de suministro de agua en el lugar de emplazamiento indicado para la instalación de la planta de procesamiento.
- Identificar puntos de mejora en la gestión del agua dentro de la instalación, y desarrollar una propuesta de mejora.
- Desarrollar un modelo matemático del balance de agua de la instalación, con la finalidad de poder utilizarlo para realizar un estudio de sensibilidad del mismo.

Índice general

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Abstract	vii
Objetivos	ix
Índice general	xii
Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MINERÍA DEL URANIO	2
1.1.1. Depósitos de Uranio	3
1.1.2. Extracción del mineral de Uranio	4
1.1.3. Procesamiento del mineral de uranio	5
1.2. EL AGUA EN LA MINERÍA	7
1.2.1. Suministro de Agua en la Minería	9
1.2.2. Consumo de Agua en la Minería	10
1.2.3. Aguas residuales en la Minería	12
1.2.4. Recuperación de agua en la Minería	14
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1. BALANCE DE AGUA EN UNA INSTALACIÓN MINERA	19
2.1.1. Diagrama de bloques y Cálculo	20
2.1.2. Caracterización y clasificación de las corrientes de agua en la mina	21
2.1.3. Salinidad	24
2.1.4. Problemas con la reutilización del agua	27
2.2. CORRIENTES RESIDUALES EN LA MINERÍA DEL URANIO	27
2.2.1. Comportamiento del uranio en solución	28
2.2.2. Aguas residuales de los diques de colas de mineral	29
2.2.3. Aguas residuales de los procesos de extracción hydrometalúrgicos	30
2.3. TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN LA MINERÍA DEL URANIO	31
2.3.1. Tratamientos activos de aguas residuales en minería	32
2.3.2. Problemas de las técnicas de tratamiento de aguas convencionales en minería	39
2.3.3. Tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales	40

3. CASO DE ESTUDIO	43
3.1. PROYECTO: COMPLEJO MINERO FABRIL CERO SOLO	43
3.1.1. Localización del yacimiento y Clima de la región	44
3.1.2. Descripción de la planta de procesamiento	46
3.2. BALANCE DE AGUA PARA EL CMFCS	50
3.2.1. Suministro de agua	50
3.2.2. Pérdidas por Evaporación	55
3.2.3. Balance de Agua	55
3.2.4. Evaluación de los resultados obtenidos en el balance	63
3.3. PROPUESTA DE MEJORA PARA EL BALANCE DE AGUA DEL CMFCS	65
3.3.1. Puntos de mejora del Balance de Agua original para CMFCS	66
3.3.2. Estudio de las pérdidas por evaporación en los equipos	68
3.3.3. Nuevo sistema de gestión del agua para la instalación	69
3.4. MODELO, SIMULACIÓN Y RESOLUCIÓN DEL NUEVO BALANCE DE AGUA	72
3.4.1. Modelo para el Nuevo Balance de Agua	72
3.4.2. Estudio de sensibilidad del Nuevo Balance de Agua	77
3.4.3. Propuesta final de mejora para el Balance de Agua del CMFCS	81
4. Conclusión	85
Referencias	89
ANEXO A	91
.1. MODELO ORIGINAL - BALANCE DE AGUA PARA EL CMFCS	91
.2. MODELO MODIFICADO - BALANCE DE AGUA PARA EL CMFCS	101
.3. MODELO MODIFICADO - SIMULACIONES	112

Índice de figuras

1.1. Diagrama de flujo para el procesamiento de minerales de uranio (Woods, 2016)	6
1.2. Yellow Cake (izquierda) y U_3O_8 (derecha) (Woods, 2016)	7
1.3. Uso del agua en el proceso hidrometalúrgico de obtención de cobre (COCHILCO, 2008) .	11
1.4. Ciclo del agua en la minería con recuperación de agua (ICMM, 2012)	16
2.1. Diagrama de flujo para la extracción de cobre por flotación (Gunson y col., 2012)	21
2.2. Diagrama de bloques del Balance de Agua (Gunson y col., 2012)	22
2.3. Tecnologías de membranas (Hintukainen, 2015).	36
2.4. Principio de funcionamiento de la electrodiálisis (Hintukainen, 2015).	41
3.1. Ubicación del Yacimiento Cerro Solo. Fuente: Propia	45
3.2. Diagrama de flujo de proceso del CMFCS (López, 2015)	46
3.3. Diagrama de Piper-Hill de muestras de YCS. Fuente: (Laboratorio de Hidrología, 2012)	54
3.4. Variación anual del Déficit Hídrico (DH). Fuente: (Laboratorio de Hidrología, 2012) . .	55
3.5. Diagrama de Bloques para el Balance de Agua del CMFCS. Fuente: (Propia)	57
3.6. Modelo del Balance de Agua en Simulink®. Fuente: (Propia)	60
3.7. Modelo del Balance de Agua en la Cisterna de Agua de Proceso. Fuente: (Propia)	61
3.8. Modelo del Balance de Agua en el Dique de Evaporación. Fuente:(Propia)	61
3.9. Cálculo de la evaporación. Fuente: (Propia)	62
3.10. Distribución de las corrientes del BA en función del caudal. Fuente: (Propia)	64
3.11. Relación entre los distintos uso del agua y el Consumo Bruto para el CMFSCS. Fuente: (Propia)	66
3.12. Diagrama de Bloques Modificado para el Balance de Agua del CMFCS. Fuente: (Propia)	69
3.13. Nuevo Modelo del Balance de Agua en Simulink®. Fuente: (Propia)	73
3.14. Balance de Agua para el Separador Sólido-Líquido en el nuevo modelo. Fuente: (Propia) .	75
3.15. Balance de Agua en la etapa de Extracción por Solventes en el nuevo modelo. Fuente: (Propia)	75
3.16. Balance de Agua para el Dique de Evaporación. Fuente: (Propia)	76
3.17. Balance de Agua para el proceso de Destilación por Membranas. Fuente: (Propia)	76
3.18. Balance de Agua sin el proceso de Destilación por Membranas. Fuente: (Propia)	77
3.19. Resultados del modelo para la variación del f_{MD} . Fuente: (Propia)	79
3.20. Resultados del modelo para la variación de [MU-1] con $f_{MD} = 0,80$. Fuente: (Propia) .	80
3.21. Resultados del modelo sin MD para la variación de [MU-1]. Fuente: (Propia)	81
3.22. Resultados del modelo sin MD para la variación del factor de dilución x_{SSL}^{dil} . Fuente: (Propia)	82

Índice de tablas

1.1.	<i>Producción mundial de uranio (tU). Modificado de (WNA, 2016)</i>	3
1.2.	<i>Principales emprendimientos mineros de uranio (2015). Fuente: (WNA, 2016)</i>	5
1.3.	<i>Consumo de agua anual y por tonelada procesada (2015). Fuente: (ICMM, 2012)</i>	10
2.1.	<i>Clasificación de las aguas residuales según su acidez. Fuente: (Lottermoser, 2010)</i>	24
2.2.	<i>Valores sugeridos del factor K para diferentes aguas industriales. Fuente: (Walton, 1989)</i>	26
2.3.	<i>Valores típicos de salinidad para diferentes tipos de agua. Modificado: (Walton, 1989)</i>	26
2.4.	<i>Composiciones típicas de aguas en diques de colas de mineral . Modificado: (Lottermoser, 2010)</i>	29
2.5.	<i>Comparación entre tecnologías de tratamiento activas y pasivas. Fuente: (Department of Water Affairs and Forestry, 2007a)</i>	32
3.1.	<i>Reservas subterráneas de agua. Fuente: (Laboratorio de Hidrología, 2012)</i>	52
3.2.	<i>Características de las aguas subterráneas en el YCS. Fuente: (Laboratorio de Hidrología, 2012)</i>	54
3.3.	<i>Corrientes del Balance de Agua para CMFCS. Fuente: (Propia)</i>	56
3.4.	<i>Datos de las corrientes del Balance de Agua para CMFCS. Fuente: (López, 2015)</i>	58
3.5.	<i>Resultados del Balance de Agua para el CMFCS. Fuente: (Propia)</i>	62
3.6.	<i>Usos del agua en el CMFCS. Fuente: (Propia)</i>	65
3.7.	<i>Pérdida de agua por evaporación en los equipos de procesos. Fuente: (Propia)</i>	68
3.8.	<i>Corrientes del Balance de Agua Modificado. Fuente: (Propia)</i>	71
3.9.	<i>Factores utilizados en el modelo. Fuente: (Propia)</i>	74
3.10.	<i>Condiciones iniciales para la simulación del modelo. Fuente: (Propia)</i>	78
3.11.	<i>Comparación entre el Balance Agua propuesto y el caso original. Fuente: (Propia)</i>	82
3.12.	<i>Resultados del Nuevo Balance de Agua para el CMFCS - $f_{MD} = 0,70$. Fuente: (Propia)</i>	83

1. INTRODUCCIÓN

El agua dulce es un recurso natural único y escaso. La necesidad de agua es vital, no solo para uso personal (consumo e higiene), sino también para toda actividad humana que se desarrolla sobre la Tierra. La demanda mundial de agua está influenciada en gran parte por el crecimiento demográfico, la urbanización, las políticas de seguridad de alimentos y energía, y los procesos macro-económicos como la globalización del comercio y los cambios en los patrones de consumo.

El agua se encuentra principalmente en los mares y océanos, que cubren el 71% de la superficie de la tierra. Sin embargo, el 97% de toda el agua existente es agua salada y sólo el 3% restante es agua dulce. Casi el 2% del agua dulce está congelada en los polos, y sólo el 1% esta en estado natural líquido, la que principalmente se encuentra en los acuíferos muy profundos y difíciles de alcanzar (Miller, 2003).

Además de la limitada disponibilidad de agua dulce en el mundo, hay una distribución desigual de este recurso en los diferentes continentes, creando zonas de abundancia y zonas de escasez. Cuando la explotación del agua supera la tasa de reposición natural puede generar grandes impactos ecológicos. Uno de los ejemplos más conocidos de estos impactos es la contracción del Mar de Aral como consecuencia del desvío, principalmente para la actividad agrícola, del agua de dos de los principales ríos que lo alimentaban (Hintukainen, 2015).

Mas allá del agotamiento de los cuerpos de agua debido al consumo excesivo, otra problemática asociada es la contaminación de los cuerpos de agua debido al vertido desmedido de residuos sólidos, líquidos y gaseosos como producto de la actividad humana. Lo que ha también producido escasez de agua limpia en ciertas zonas. La mayoría de los problemas relacionados con la calidad del agua son causados por la agricultura intensiva, la producción industrial, la minería y las aguas residuales y escorrentías urbanas (WWAP, 2015).

Para dar solución a estos problemas sin dejar de satisfacer la creciente necesidad de agua limpia, es necesario recuperar y reutilizar estas aguas, utilizando las mejores tecnologías de tratamiento de agua disponible. El objetivo que se busca alcanzar en estos sistemas de tratamiento de agua es una descarga de líquido cero, es decir, que se recupere toda el agua que ingresa al proceso sin la necesidad de descargar efluentes al ambiente. Esto también se puede traducir en una mayor disponibilidad de agua para otros usos, como ser el riego, el consumo o la higiene. Sin embargo, lograr este cometido, hoy en día, está lejos ser un proceso económicamente viable debido principalmente a limitaciones técnicas de los métodos de tratamiento de aguas actuales. En este contexto, la investigación y desarrollo de nuevos procesos de tratamiento de agua con tecnologías de avanzada y eficientes deberían ser una prioridad a nivel mundial.

El problema de la escasez del agua mencionado, sumado a los grandes volúmenes implicados en las operaciones mineras y la necesidad de tratamiento ante cualquier descarga al medio ambiente, ha cambiado la visión de la industria minera en cuanto a invertir tiempo y recursos para conservar y reciclar el agua utilizada. Al igual que en otros sectores productivos, la inercia y el dominio de una tecnología han llevado a que rara vez sean aplicadas prácticas sustentables que logren una plena utilización de los recursos con procesos más amigables con el medio ambiente. Sin embargo, en los últimos años, ya sea por acciones regulatorias

ambientales o por lograr mejores rentabilidades, el sector minero está poniendo mayor énfasis en la utilización eficaz de los recursos y la reutilización de las sustancias descartadas como residuos (Dudeney y col., 2013).

Podemos identificar que los proyectos mineros dependen, en gran medida, de un suministro de agua seguro, y las empresas que lo gestionan tienen la responsabilidad de utilizar los recursos de agua de una manera eficiente y de manera ambientalmente aceptable. El principal uso del agua en el sector minero está relacionada con el procesamiento de los minerales y, en mucha menor medida, en el uso como agua potable en el campamento minero. El suministro y una gestión eficaz del agua son componentes importantes del éxito de una mina y, a veces pueden determinar la viabilidad de un proyecto. Por lo tanto, en el contexto del desarrollo de un proyecto minero, los problemas del agua y los riesgos asociados deben ser cuidadosamente evaluados. La reutilización de las corrientes residuales juegan un papel más que importantes en este contexto (Idrissy y col., 2012).

En las siguientes secciones se presenta una breve descripción de los procesos asociados con la minería del uranio, que es el área donde se desarrolla el caso de estudio que se presenta en el siguiente capítulo. También se hace referencia al consumo de agua en la industria minera y a las aguas residuales que genera, así como también, a las tecnologías disponibles para el tratamiento de aguas.

1.1. MINERÍA DEL URANIO

El objetivo final de la minería del uranio es la obtención de concentrados de uranio que constituyen la materia prima fundamental para la fabricación de cualquier tipo de combustible nuclear, ya sea a base de uranio natural o enriquecido. Dichos combustibles nucleares son utilizados principalmente en las centrales nucleares de potencia para la generación de energía eléctrica, o en reactores de investigación de baja potencia para la fabricación de radioisótopos utilizados en medicina nuclear (Kidd, 2009).

En las plantas de procesamiento de minerales de uranio, dicho metal es extraído de la roca en la que se encuentra presente, concentrado y purificado parcialmente, para convertirlo en un producto intermedio parcialmente refinado conocido industrialmente como *Yellow Cake*, por su color amarillo característico. El contenido en óxidos de uranio (U_3O_8) en este concentrado generalmente está entre 75 % y 85 % en peso. El uranio se encuentra generalmente bajo la forma química de diuranato de amonio (ADU) o de uranil tricarbonato de amonio (AUC) dependiendo del proceso utilizado para su obtención. Este concentrado de uranio es posteriormente tratado en otras facilidades para obtener uranio metálico, óxido de uranio (UO_2) o Hexafluoruro de uranio (UF_6) de pureza nuclear (Merritt, 1971).

Debido a su uso en cualquier tipo de programa de energía nuclear, el concentrado de uranio hoy en día representa un *commodity* que se comercializa diariamente en el mercado internacional. Kazajistán, Canadá, Australia y Níger son los principales productores a nivel mundial (más del 77 % de la producción mundial). En la Tabla 1.1 se presentan la producción mundial de uranio en los últimos cinco años, la cual para el año 2015 ha sido de 60.514 toneladas de uranio (equivalente a 71.364 toneladas de U_3O_8) que representan el 90 % de la demanda mundial (WNA, 2016)

1.1.1. Depósitos de Uranio

En el planeta existen varias zonas en que la concentración de uranio en el suelo es suficientemente alta para que la extracción del mismo sea económicamente factible, a estas zonas se los denomina yacimientos geológicos. Las principales formas minerales en que podemos encontrar al uranio es la uraninita (básicamente UO_2) o la pechblenda ($U_2O_5 \cdot UO_3$, más conocido como U_3O_8), entre otras gamas de minerales de uranio que se pueden encontrar en depósitos particulares o secundarios.

El uranio aparece en varios entornos geológicos como el ígneo, el hidrotérmico y el sedimentario. Los depósitos de uranio en todo el mundo se han clasificado en 14 categorías principales de tipos de depósito en base a las características geológicas de estos (Kidd, 2009). Entre los depósitos de uranio más significativos podemos citar:

- *Asociados a discordancias geológicas:* Constituyen aproximadamente el 30 % de los recursos mundiales de uranio e incluyen algunos de los más grandes y más ricos depósitos. Los minerales son uraninita y pechblenda. Los principales yacimientos se encuentran en Canadá y Australia. Se han encontrado yacimientos con leyes de uranio de hasta 20 % U_3O_8 .
- *Areniscas:* constituyen aproximadamente el 18 % de los recursos mundiales de uranio. Yacimientos de este tipo son comúnmente grado bajo a medio (0,05-0,4 % U_3O_8) y cuerpos mineralizados individuales son de tamaño pequeño a mediano (que pueden llegar a un máximo de 50.000 toneladas de U_3O_8). Los principales minerales de uranio son la uraninita y la coffinite. Los depósitos mas importante se encuentran en Kazajistán, Niger, Uzbekistan, Sudáfrica y USA.
- *Conglomerados de cuarzo:* Representan aproximadamente el 13 % de los recursos de uranio

Tabla 1.1. Producción mundial de uranio (tU). Modificado de (WNA, 2016)

País	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Kazajistán	17803	19451	21317	22451	23127	23800
Canada	9783	9145	8999	9331	9134	13325
Australia	5900	5983	6991	6350	5001	5672
Niger	4198	4351	4667	4518	4057	4116
Rusia	3562	2993	2872	3135	2990	3055
Namibia	4496	3258	4495	4323	3255	2993
Uzbekistan	2400	2500	2400	2400	2400	2385
China	827	885	1500	1500	1500	1616
USA	1660	1537	1596	1792	1919	1256
Ucrania	850	890	960	922	926	1200
Sudáfrica	583	582	465	531	573	393
India	400	400	385	385	385	385
Rep. Checa	254	229	228	215	193	155
Rumania	77	77	90	77	77	77
Pakistan	45	45	45	45	45	45
Brasil	148	265	326	192	55	40
Francia	7	6	3	5	3	2
Alemania	8	51	50	27	33	0
Malawi	670	846	1101	1132	369	0
Total (t U)	53671	53493	58489	59331	56041	60514
Total (t U_3O_8)	63295	63084	68976	69969	66089	71364

del mundo. El uranio se recupera como subproducto de la minería de oro, el grado puede ser tan bajo como 0,01 % U_3O_8 . En los depósitos extraídos exclusivamente para el uranio, leyes promedio llegan hasta el 0,15 % U_3O_8 . Depósitos individuales varían en tamaño desde 6.000 a 170.000 toneladas de U_3O_8 . Los principales depósitos se encuentran en Canadá y Sudáfrica.

Desde el punto de vista de la minería, los distintos tipo de yacimientos geológicos pueden ser clasificados dos categorías (IAEA, 1993).

- *Cuerpos minerales sedimentarios*: Se presentan como capas sub-horizontales con espesor variable de varias decenas de centímetros a varias decenas de metros.
- *Cuerpos minerales en vetas*: Se presentan a menudo como cuerpos sub-verticales con espesor variable desde varias decenas de centímetros a varias decenas de metros.

1.1.2. Extracción del mineral de Uranio

La decisión en cuanto a qué método de extracción del mineral se debe utilizar para un depósito en particular se rige por la naturaleza del yacimiento, los factores de seguridad intrínseco y las estimaciones económicas. Las técnicas de extracción utilizadas son básicamente dos: mediante excavación o mediante técnicas de tratamiento in situ, a su vez, se pueden distinguir entre la minería a cielo abierto y subterránea entre las técnicas de excavación.

Históricamente, el uranio se ha extraído en minas subterráneas o a cielo abierto, y el mineral extraído es luego procesado física y químicamente en plantas hidrometalúrgicas convencionales, ubicadas en las inmediaciones de la mina, para producir el concentrado de uranio. En los últimos años, las técnicas alternativas, como la lixiviación in situ (ISL), ha ganado bastante terreno. En la Tabla 1.2 se presentan los principales emprendimientos mineros de uranio en el mundo, la técnica de extracción utilizada y su capacidad de producción anual. Estos 15 emprendimientos producen más del 66 % de la producción mundial de uranio, de los cuales 40 % utilizan minería subterránea, 40 % utilizan ISL y el restante utilizan minería a cielo abierto (WNA, 2016).

En general, la minería a cielo abierto se utiliza si los depósitos se encuentran cerca de la superficie y subterránea se utiliza para los depósitos profundos, normalmente mayores a los 120m de profundidad. Las minas a cielo abierto requieren grandes fosas o canteras en la superficie, más grande que el tamaño del yacimiento, debido a que las paredes de la cantera deben estar en pendiente para evitar el colapso. Como resultado, la cantidad de material que debe ser eliminado para acceder al mineral es mayor. En este tipo de técnica de extracción también se deben proteger a las canteras de inundaciones producto de captación de cuencas existentes o de escorrentías superficiales, así como también requieren del control de los flujos de agua subterránea (Kidd, 2009).

Las minas subterráneas tienen relativamente pequeña perturbación de la superficie y la cantidad de material que debe ser eliminado para acceder al mineral es considerablemente menor que en el caso de una mina a cielo abierto. Este tipo de técnica implica la construcción de pozos de acceso y túneles con sus respectivos niveles de seguridad. En el caso de las minas de uranio subterráneas se deben considerar precauciones especiales, como ser mejores sistemas de ventilación, que los utilizados para otros minerales, para proteger contra la exposición a la radiación del radón presente en el aire (Kidd, 2009).

La técnica de lixiviación in situ (ISL) implica dejar el mineral en el suelo, y con el uso de líquidos que son bombeados dentro del yacimiento recuperar los minerales por lixiviación, extrayendo finalmente esta solución cargada en uranio. En consecuencia, existe poca perturbación de la superficie y no se generan colas de minera ni residuos estériles. Sin embargo, el yacimiento debe ser permeable a los líquidos utilizados, y situado de manera que no contaminen el agua subterránea lejos del yacimiento. Los depósitos de uranio adecuados para ISL se producen en acuíferos de arena o areniscas permeables, confinado por encima y por debajo por estratos impermeables, como las que están por debajo del nivel freático. El sistema de lixiviación a utilizar queda determinado por la geología y las aguas subterráneas presentes en la zona. Si la presencia de calcio no es significativa en el cuerpo mineral (como piedra de cal o yeso), la lixiviación alcalina (carbonato) debe ser utilizada. De lo contrario, la lixiviación ácida (sulfúrico) es generalmente la mejor opción. Las técnicas para la ISL han evolucionado hasta el punto en que es un método controlable, seguro y respetable con el ambiente, que puede operar bajo estrictos controles ambientales y que a menudo los costes son menores (Kidd, 2009).

1.1.3. Procesamiento del mineral de uranio

El procesamiento de los minerales de uranio implica procesos físicos y químicos mixtos con el fin de extraer, purificar y concentrar el uranio presente en el mineral. Estos procesos no son muy diferentes a los utilizados en la obtención de otros minerales. En la Figura 1.1 se presenta un diagrama de flujo típico para el procesamiento del mineral de uranio.

A continuación se realiza una breve descripción de las etapas más significativas (Woods, 2016; IAEA, 1993)

- **Reducción de tamaño (Crushing & Grinding):** La trituración (producción de fragmentos de tamaño del orden del centímetro) y la molienda (producción de arena o partículas de tamaño del orden del milímetro) del mineral que abandona la mina son generalmente empleados para alcanzar el tamaño de partícula requerido para una lixiviación efectiva y producir una pulpa de mineral que pueda ser bombeada a través del circuito. Ambos son

Tabla 1.2. Principales emprendimientos mineros de uranio (2015). Fuente: (WNA, 2016)

Mina	País	Técnica	Producción tU/año	% Mundial
McArthur River	Canadá	Subterránea	7354	12
Cigar Lake	Canadá	Subterránea	4345	7
Tortkuduk y Myunkum	Kazajistán	ISL	4109	7
Olympic Dam	Australia	Subterránea	3179	5
SOMAIR	Niger	A cielo abierto	2509	4
Inkai	Kazajistán	ISL	2234	4
Budenovskoye 2	Kazajistán	ISL	2061	4
South Inkai	Kazajistán	ISL	2055	3
Priargunsky	Rusia	Subterránea	1977	3
Langer Heinrich	Namibia	A cielo abierto	1937	3
Central Mynkuduk	Kazajistán	ISL	1847	3
Ranger	Australia	A cielo abierto	1700	3
Budenovskoye 1, 3, 4	Kazajistán	ISL	1642	3
Rabbit Lake	Canada	Subterránea	1621	3
COMINAK	Niger	Subterránea	1607	3
Total (15)			40177	66,4

procesos mecánicos, la trituración es generalmente un proceso en seco, mientras que la molienda es típicamente un proceso húmedo. Para minerales de muy baja ley, pueden además incluir una etapa de concentración gravimétrica.

- **Lixiviación (Leaching):** El uranio es extraído del mineral molido, mediante un proceso de extracción sólido-líquido, usando soluciones ácidas (sulfúrico) o alcalinas (carbonatos) con o sin calentamiento y con o sin el agregado de oxidantes. La lixiviación de forma dinámica puede ser realizada en tanque agitado mecánicamente, tanque agitado con aire (Pachuca) o en autoclaves a presión y temperatura. La técnica estática mas utilizada es la lixiviación en pilas (*heap leaching*), que consiste en la dispersión de la solución lixiviante sobre una cierta cantidad de mineral prefijado, donde la solución va percolando por gravedad y lixiviando a su paso el uranio. Es un proceso mas lento y más económico que se utiliza generalmente con los minerales de baja ley.
- **Separación Sólido-Líquido (Separate Solids):** La solución lixiviante cargada en uranio es

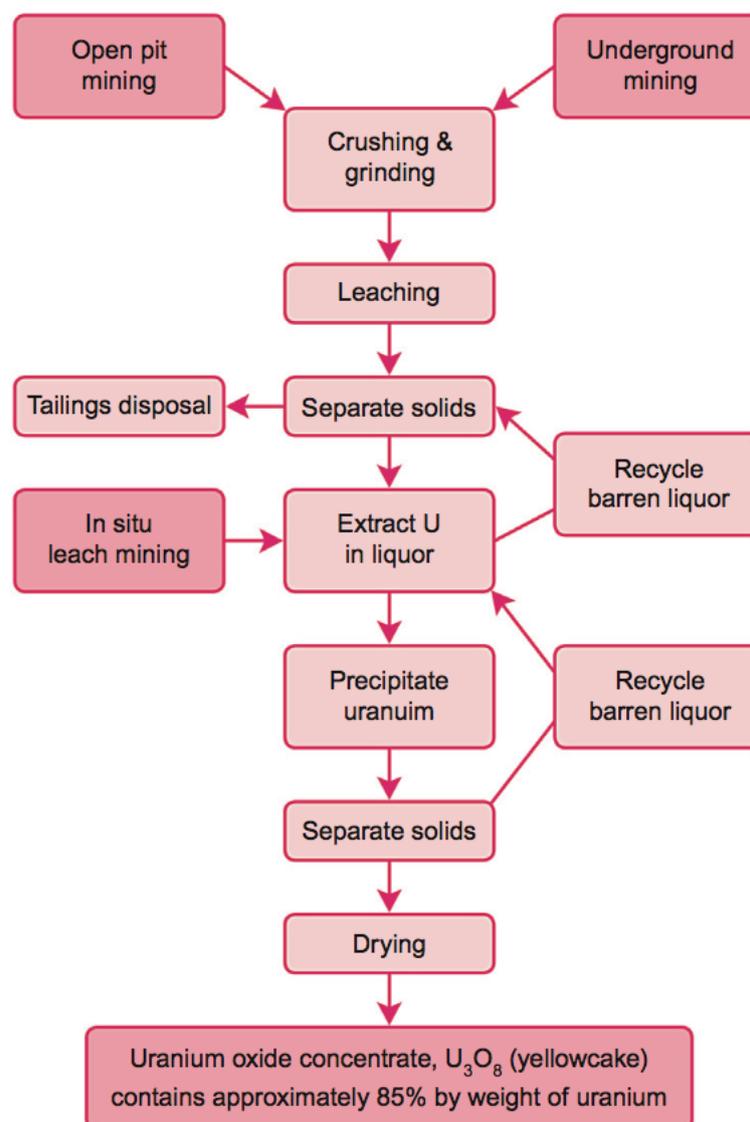


Figura 1.1. Diagrama de flujo para el procesamiento de minerales de uranio (Woods, 2016)

separada de la pulpa del mineral. Existen diversos equipos que pueden ser utilizados para lograr este cometido, como: los ciclones, los decantadores en contracorriente o los filtros.

- **Purificación y Concentración (*Extract U in liquor*):** La tecnología utilizada va a depender de la concentración de uranio y de las impurezas presentes en la solución acuosa de lixiviación. Las técnicas más utilizadas son las resinas de intercambio iónico (las cuales presentan afinidad especial por ciertos compuestos de uranio) y la extracción por solventes (extracción líquido-líquido con solvente afin al uranio) o una combinación de ambas técnicas.
- **Precipitación (*Uranium precipitation*):** El uranio disuelto es precipitado de la solución en una o más etapas en tanques agitados o lechos fluidizados, usando reactivos como hidróxido de sodio, de amonio, de magnesio o peróxido de hidrógeno. El precipitado es finalmente filtrado o deshidratado mediante decantación y centrifugación. El producto obtenido es el concentrado de uranio o *yellow cake*.
- **Secado o calcinación (*Drying*):** El concentrado es secado para alcanzar la humedad requerida. Es posible utilizar distintos: secadores de una etapa, secadores multietapas, secadores spray, secadores de tornillo o secadores de calor radiante. En algunos casos el concentrado es calcinado en hornos para obtener directamente óxidos de uranio (U_3O_8) y recuperar el amoníaco utilizado en la precipitación. Finalmente el concentrado es empacado en tanque de acero revestido con polietileno. En la Figura 1.2 se puede observar el concentrado seco empacado (amarillo) y el concentrado calcinado (verde oscuro).
- **Diques de colas y recirculación líquidos:** El proceso debe incluir el tratamiento de las colas o estériles que abandonan el proceso, así como también recircular la mayor cantidad de agua posible utilizada en el proceso. Se deben incluir los tratamientos necesarios para disminuir las descargas al ambiente.



Figura 1.2. *Yellow Cake* (izquierda) y U_3O_8 (derecha) (Woods, 2016)

1.2. EL AGUA EN LA MINERÍA

Una de las variables más importantes para todo proyecto minero, desde las fases de pre-factibilidad hasta las de operación, es la disponibilidad de agua. El agua es necesaria en las

minas para la supresión de polvo, procesamiento de minerales, lavado de minerales, extracción hidrometalúrgica, entre otras operaciones. Para estas aplicaciones, el agua se puede extraer de cuerpos de agua superficiales (arroyos, ríos o lagos), de acuíferos subterráneos, o como subproducto del proceso de desagüe o desagote del agua en las minas. En muchos países, la extracción de agua está muy regulada, por lo que se restringe la cantidad de agua que se puede utilizar. Por ende el acceso a un suministro de agua seguro y estable es fundamental para las operaciones mineras. Sin agua, una mina no puede funcionar. Por lo tanto, la disponibilidad y la adecuada gestión del agua es clave para la sostenibilidad de la actividad minera.

Las minas que operan en regiones con variaciones estacionales extremas de temperatura o las precipitaciones se enfrentan a retos difíciles de gestión del agua. En temporadas donde la precipitación puede ser muy alta por sólo uno o dos meses, el agua debe ser manejada para evitar la inundación de los laboreo mineros y desbordes de diques de colas. En estos casos, las instalaciones de almacenamiento de agua se diseñan con los factores de seguridad correspondientes. En zonas donde se producen las condiciones de *permafrost* o donde los inviernos son muy duros, el agua puede llegar a congelarse y que la mina no pueda disponer de ella con facilidad. Estas condiciones extremas de temperatura también pueden conducir a condiciones de funcionamiento difíciles, por lo que, los sistemas de abastecimiento de agua deben diseñarse de modo que las tuberías no se congelen (ICMM, 2012).

Es preciso mencionar también la relación que hay entre el agua y la minería en la generación de uno de los mayor es problemas ambientales que presenta la minería, el Drenaje Ácido de Mina (DAM). El DAM son aguas ácidas generadas por la oxidación biogeoquímica de los sulfuros contenidos en los desechos y laboreo mineros al entrar en contacto con agua meteóricas, superficiales o subterráneas. El DAM drena desde escombreras, diques de colas, canteras, laboreo subterráneas, pilas de stock entre otras instalaciones. Generalmente posee pH entre 2-4 y elevadas concentraciones de elementos, en especial metales, tóxicos peligrosos para el medio ambiente. Dentro del contexto del agua requerida por la minería, el DAM también puede ser una fuente de agua capaz de ser utilizada en diversas operaciones en la mina. En la mayoría de los países con actividad minera, las regulaciones ambientales exigen que este tipo de drenaje tenga el tratamiento adecuado, lo que hace aún mas práctico el uso de esta fuente de agua para disminuir la demanda de agua fresca (Simate y col., 2014).

La industria minera ha encontrado muchas vías innovadoras para evitar competir con otros usuarios de agua. Por ejemplo, las empresas mineras a veces tienen la capacidad de invertir en infraestructura para obtener fuentes de agua que pueden ser de utilidad para otros usuarios. La minería es una de las pocas industrias que es capaz de utilizar la misma agua en varios procesos, calidad inferior a la requerida para el consumo humano. Además, puede utilizar algunos suministros de agua no convencionales. Por ejemplo, el agua de mar puede ser utilizada para el procesamiento de minerales, las aguas subterráneas hipersalinas y las aguas residuales procedentes de otras industrias también pueden ser fuentes potenciales de agua para las operaciones mineras. En la mina de Minera Esperanza, en Chile, el agua de mar no tratada se utiliza directamente en ciertas operaciones (ICMM, 2012).

En la actualidad, la industria minera ha cambiado su perspectiva y asigna una importancia esencial para el uso racional y eficiente del agua en sus operaciones, la adopción de medidas para optimizar el consumo a través de mejores prácticas de gestión y/o la introducción de mejores tecnologías que reduzcan la demanda, y con ello tener mayor disponibilidad del recurso. Entre estas medidas se incluye: recirculación del agua en las operaciones, tratamiento de las aguas residuales para su reutilización, desalinización y uso directo de agua salada, mejora de la gestión de colas de mineral mediante el desarrollo de técnicas que aumentan las concentraciones de sólidos (liberando agua) y el control de infiltraciones sobre el terreno, entre

otras medidas adoptadas (COCHILCO, 2008).

1.2.1. Suministro de Agua en la Minería

Un suministro sostenible de agua de la mina es necesario para satisfacer la demanda de agua de proceso y proporcionar agua potable para la comunidad minera. El suministro de agua puede llegar a convertirse en un aspecto crítico en la planificación y desarrollo de un proyecto minero, sobre todo en zonas áridas o en zonas que experimentan estaciones secas prolongadas. Las fuentes de suministros puede proceder de las aguas superficiales como lagos, embalses o ríos, o de las aguas subterráneas. En las zonas áridas, el agua subterránea es a menudo la única fuente. La elección de una u otra fuente de suministro dependerá de la disponibilidad de la zona donde se emplace la mina. En USA en 2010 cerca del 73% del agua extraída para uso en minería fue de agua subterránea (Maupin y col., 2014). En cambio en Canadá, un país con una importante industria minera, la extracción de agua alcanzó los $497 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ de los cuales más del 77% fue de fuentes superficiales de agua (Statistics Canada, 2012).

Proporcionar un suministro sostenible de agua para una mina implica diversos desafíos y requiere una investigación especializada y estudios entre los cuales podemos citar los más importantes (Idrissy y col., 2012):

- *Identificación y evaluación de los recursos hídricos.*
- *Modelado del comportamiento de las aguas subterráneas y superficiales.*
- *Estimación y análisis de la captación y recarga del acuífero.*
- *Diseño de los sistemas de bombeo y de los pozos de captación de agua.*

Existen varias técnicas para estimar los recursos de aguas subterráneas, acuíferos. La mayoría de estas técnicas dan como resultado una estimación del tamaño, de los parámetros físicos y de la recarga de los acuíferos en estudio. Es importante cuando se realizan estos estudios tener a disposición buenos registros climáticos, durante lapsos de tiempo razonables y teniendo en cuenta los casos extremos, para identificar períodos con posibles déficit en el suministro de agua, que podrían no ser bien identificados utilizando solamente los datos promediados (Idrissy y col., 2012).

La disponibilidad de agua normalmente se rige por las condiciones del sitio, como el clima, la morfología del terreno, la disposición de la mina y la cubierta vegetal. Como resultado de esto, muchas operaciones se enfrentan a restricciones en el uso del agua. La industria minera y metalúrgica a menudo tiene que competir por el agua con otras industrias, como la agricultura y los usuarios domésticos. Empresas mineras en países que enfrentan problemas de escasez de agua y que tienen una industria minera en expansión, como Chile y Australia, ya están recurriendo a fuentes de suministro no convencionales como el agua de mar, con nuevas tecnologías de desalinización, a pesar de que sus instalaciones están ubicadas a kilómetros de distancia de las costas marítimas (Dudeney y col., 2013).

Normalmente las minas se extienden por debajo del nivel freático, por lo que experimentan un flujo natural y continuo de agua, por ejemplo en las canteras o en los túneles subterráneos, y esta agua tiene que ser eliminada (a través de bombeo) de modo que se pueda acceder a los trabajos de la mina. Esto se conoce como desagüe o desagote del agua de mina (*Dewatering*). En particular, las minas que interceptan acuíferos subterráneos importantes, o las que están

situadas en climas húmedos, pueden tener que bombear más de 100.000 litros por minuto para evitar la inundación de los trabajos de mina. Esta agua es descargada normalmente a una fuente de agua receptora, para no afectar la capacidad del acuífero, si cumple de los requisitos normativos y ambientales. Este volumen de agua también representa una fuente importante de agua con capacidad de ser utilizada en la mina dentro de los procesos de operación. El desagote de agua de la mina puede reducir los niveles de agua subterránea (nivel freático) o agotar el agua superficial. Además esta cantidad de agua requiere de una gestión adecuada para su descarga al medio receptor, en términos de calidad y cantidad (Lottermoser, 2010).

1.2.2. Consumo de Agua en la Minería

La industria minera consume grandes cantidades de agua, la minería del cobre solamente a utilizado más de 1.300 millones de metros cúbicos (1×10^6 m³) de agua en 2006. A escala mundial, sin embargo, el uso del agua para la mina representa una pequeña porción del uso total de agua utilizada. Incluso en países relativamente secos, con minería intensiva como Australia, Chile o Sudáfrica, el consumo de agua para la mina no supera el 4,5 % de la demanda nacional del agua. Sin embargo, cuando la minería se lleva a cabo en las zonas donde el agua es escasa, este consumo de agua puede afectar a los suministros locales (Gunson y col., 2012).

Los consumos de agua varían ampliamente entre las distintas instalaciones mineras para distintos minerales, incluso cuando determinados tipos de minas se encuentran ubicadas en las mismas zonas geográficas. El consumo promedio de agua en la industria minera en 2003 osciló entre 0,4 y 1,0 metro cúbico por tonelada de mineral procesado (m³/t). Un estudio transversal del uso de agua específicamente para la minería del cobre realizado en 2006 develó que la extracción de agua para minas de cobre con procesos de flotación convencionales iban de los 0,34 hasta 2,07 m³/t de mineral procesado, con una media ponderada en 0,96 m³/t (Gunson y col., 2012). En la Tabla 1.3 se presentan tres instalaciones mineras y su respectivos consumos de agua anual y en función de su producción (ICMM, 2012), donde se puede tener una idea de los volúmenes que maneja esta industria.

Tabla 1.3. Consumo de agua anual y por tonelada procesada (2015). Fuente: (ICMM, 2012)

Mina	Ubicación	Mineral	Consumo de agua	
			1x10 ⁶ m ³ /año	m ³ /t
Minera Esperanza Antofagasta	Chile	Au - Co	20	0,56
Trekkopje Uranium Mine	Namibia	U	14	0,38
Olympic Dam	Australia	Au - Ag - U	12	1,07

Vale la pena hacer una distinción entre consumo y utilización. El consumo de agua incluyen todas aquellas actividades en las que el uso del agua produce pérdidas en relación con la cantidad inicialmente suministrada. En este contexto la industria minera solamente utiliza el agua en sus procesos de extracción, pero el agua en si no es parte del producto final. Hablar de consumo en minería se refiere a la fracción de agua que se pierde por evaporación, que queda retenida en las colas de mineral procesado o que presenta una calidad no apta para ser descargada al medio ambiente, por lo que no puede ser devuelta al curso de agua de la que se obtuvo. Reducir el consumo de agua en la minería, implicada una serie de acciones que van desde la mejorar la eficiencia del uso en los procesos, la recuperación y reutilización, y los avances tecnológico en nuevas técnicas para mejorar la calidad final del agua que abandona una instalación minera.

En este contexto podemos situar a la minería como una industria con un uso intensivo del

agua. En la Figura 1.3 se presenta un diagrama de bloques para la obtención de cobre mediante un proceso de extracción y concentración hidrometalúrgico, donde se puede identificar la participación del agua en todas sus operaciones (COCHILCO, 2008).

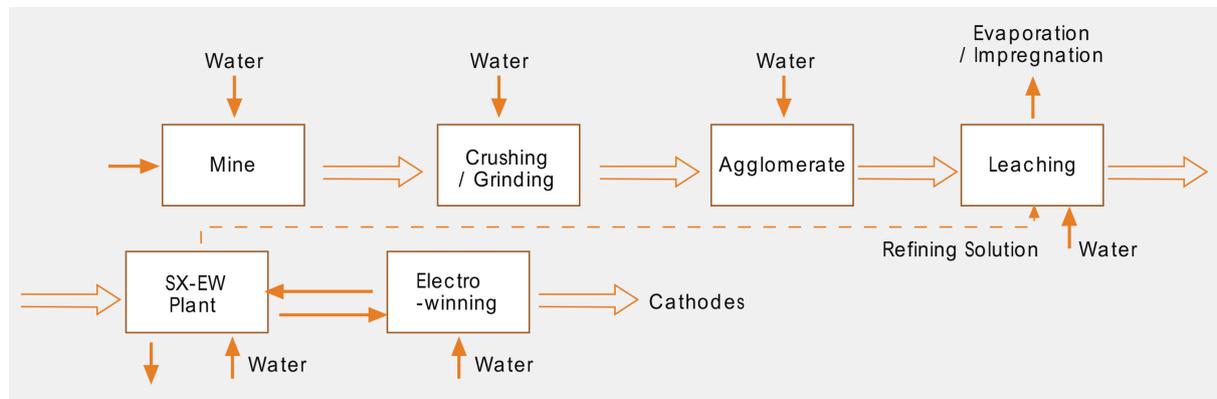


Figura 1.3. Uso del agua en el proceso hidrometalúrgico de obtención de cobre (COCHILCO, 2008)

En la mina el uso del agua depende del tipo de extracción. En la minería a cielo abierto, el principal uso es para riego de caminos con el fin de reducir el polvo en suspensión, este consumo es variable, pero en algunas minas ha llegado a ser del 15% del total consumido. En cambio, en la minería subterránea, el consumo de agua se reduce y el problema consiste principalmente en la extracción de agua que se junta en el fondo de los laboreos, que pueden proceder de la lluvia o de infiltración de agua subterránea (COCHILCO, 2008).

Los procesos de trituración y molienda (en especial los de molienda húmeda), de separación y concentración física (como los de flotación) son los procesos que utilizan agua, entre el 70% y 80% del total de la planta. Esto se debe principalmente a la generación de pulpas de mineral, donde sus concentración de sólidos juega un papel fundamental en el consumo de agua. Los procesos hidrometalúrgicos (lixiviación, extracción por solventes y electro-deposición) posteriores usan el 10% y 20%. Un estudio realizado para la minería del cobre en el año 2006 en Chile muestra como resultado un consumo de 0,79 m³/t para las etapas de molienda y concentración física, y 0,13 m³/t para los procesos hidrometalúrgicos, reportando una extracción media de agua de 11,9 m³/s (375 1x10⁶ m³/año) (COCHILCO, 2008).

En los casos en los que se usan pilas de lixiviación (sin molienda húmeda) grandes cantidades de agua son aplicadas sobre mineral triturado de baja ley. Una parte significativa de la solución de lixiviación aplicada inicialmente se pierde en la humectación de la pila de mineral hasta alcanzar el contenido de agua que permite el drenaje de la solución de lixiviación. El agua también se pierde por evaporación. A medida que estas pilas crecen en tamaño, el consumo de agua aumenta en forma proporcional (Schumann y col., 2009).

Además del uso de agua en los procesos mencionados anteriormente una instalación minera también necesita agua para el tratamiento final del metal (fusión y refinado eléctrico) que puede requerir cantidades no despreciables de agua (Dudeney y col., 2013).

El uso de mineroductos para transportar el mineral en suspensión puede reducir los costos y la demanda de energía haciendo que depósitos remotos sean económicamente factibles, a expensas del uso de cantidades significativas de agua para mantener el material en suspensión (ICMM, 2012).

Las pérdidas de agua más importantes en una instalación minera, que impacta fuertemente al consumo, se producen gracias a los procesos de evaporación y filtración del agua de los embalses mineros o diques de colas (mineral agotado). Existen una serie de opciones para

reducir el de agua que queda retenida con las colas del mineral procesado. Una de estas opciones es la instalación de drenajes debajo de los embalses, que no solo recuperen el agua que pueda filtrarse sino también que representen una barrera de seguridad medioambiental. Un sistema de clasificación por tamaño es otra opción para reducir el arrastre de agua en colas, en muchos emprendimientos mineros se utilizan hidrociclones para separar la fracción gruesa de la fina disminuyendo el agua que se pierde en las fracciones gruesas. Espesadores o sedimentadores también son utilizados con este fin. Para reducir aún más la evaporación en este tipo de instalaciones, que presentan grandes espejos de agua, algunas minas utilizan cubiertas flotantes en las balsas de residuos. Alternativas tales como bolas de plástico flotantes son utilizadas con resultados muy positivos (Gunson y col., 2012).

1.2.3. Aguas residuales en la Minería

En las instalaciones modernas, las aguas residuales son descargadas a estanques y balsas de residuos. Por el contrario, en sitios mineros antiguos, la práctica más común era el vertido incontrolado de agua residual a socavones o pozos en contacto directo con el ambiente. En general, el volumen de agua residual generado en las minas es mucho mayor que el volumen de los residuos sólidos. En las minas, el agua entra en contacto con los minerales y los disuelve, por lo tanto, estas aguas llevan a menudo disueltos metales y material particulado. Cuando dichas aguas cargadas llegan a los cuerpos de agua (lagos, ríos o acuíferos) pueden causar turbidez y sedimentación no deseada, que puede alterar la temperatura y su composición química pudiendo generar también efectos tóxicos sobre las plantas y los animales (Lottermoser, 2010).

Las aguas residuales producidas por la industria minera se pueden dividir en dos categorías en función de sus fuentes y mecanismos de producción: los efluentes y el drenaje de la mina (Hintukainen, 2015):

- **Efluentes:** Se componen de todas las corrientes residuales que abandonan las distintas etapas del proceso de extracción y refinación que solo se producen mientras la mina esta en operación. La fracción más importante de los efluentes la componen las colas de mineral, que son suspensiones en agua de mineral agotado, triturado y molido, que abandonan el proceso de lixiviación. Estas colas de mineral pueden contener grandes cantidades de sólidos finos, así como compuestos disueltos, tales como sales, metales y/o compuestos químicos agregados. En la mayoría de los casos, las colas se vierten en lagunas, estanques artificiales o balsas, donde la parte sólida se separa por gravedad de la parte líquida. Otorgando el tiempo de retención suficiente, la solución sobrenadante (libre de sólidos) es posible de ser recuperada y reciclada al proceso de extracción con el fin de reducir el consumo de agua y minimizar el volumen de residuos (Wang y col., 2014). Otra fracción de estos efluentes la forman las corrientes residuales generadas en los procesos hidrometalúrgicos de purificación y concentración, pueden tener una escala mucho más pequeña que los generados por ejemplo en las etapas de procesamiento físico de los minerales. Sin embargo, estos pueden representar un mayor riesgo debido a su elevada toxicidad y a la posibilidad de infiltración o escorrentía de especies solubles o de reactivos en exceso con capacidad de reaccionar (Dudeney y col., 2013). Finalmente la última fracción, y la más pequeña, la componen las aguas residuales generadas específicamente por la actividad humana en los campamentos u oficinas de la instalación.
- **Drenaje de mina:** Se forma cuando los minerales del terreno presente naturalmente en el lecho de roca son expuestos al agua y al oxígeno como resultado de la operación de minería. Esto conduce a la oxidación de los metales y a la disolución de los mismos en

estas aguas. Este tipo de aguas residuales son generadas por filtraciones en las balsas o diques de colas, por las precipitaciones sobre el material estéril o de baja ley acumulado en escombreras, inundación de los laboreos subterráneos o de las canteras a cielo abierto, entre otros. Los drenajes pueden ser ácidos (drenaje ácido de minas, DAM) o alcalino (drenaje alcalino de mina, DLM), dependiendo de la composición mineral de la roca madre. El DAM es generalmente más común y se produce típicamente cuando sulfuros que contiene minerales como pirita (FeS_2) se oxidan en presencia de agua y oxígeno, formando iones sulfato en el medio acuoso, es decir, ácido sulfúrico. Este cambio de acidez en el agua, acelera la disolución de los metales (Fe, Al, Mn) y metaloides (As) aumentando los riesgos de contaminación asociados a estas aguas. El DLN natural es producido principalmente por la disolución de grandes cantidades de carbonato que contiene el mineral en forma natural, sobre todo de piedra caliza (CaCO_3). Se genera más comúnmente en las minas subterráneas, que en las minas a cielo abierto, y generalmente no se lo considera tan perjudicial para el medio ambiente como el DAM (Hintukainen, 2015).

Como se observó las distintas categorías de aguas residuales generadas en la minería difieren en sus mecanismos de generación y por lo tanto en sus propiedades. Los drenajes por lo general no contienen muchas sustancias químicas derivadas del uso en los procesos de refinación, debido a que no se producen en las instalaciones de explotación sino en el propio terreno, principalmente por acción del agua de lluvia o escorrentías superficiales. Esto también significa que la recolección de estos volúmenes de agua con el propósito de ser tratada es considerablemente más difícil. Además, una vez que se inicia el proceso de oxidación (oxidación biológica), este drenaje es continuo y puede durar largos períodos de tiempo, incluso después del cierre de la mina, hasta que los depósitos minerales se hayan agotado de compuestos solubles. Por esta razón, la prevención de la generación de drenaje de mina es por supuesto mucho más económica y ecológica que la acción posterior de recolección y tratamiento de estos drenajes (Hintukainen, 2015). Esto se puede conseguir en cierta medida desviando las escorrentías superficiales y reduciendo el nivel freático, para controlar el flujo infiltración de agua subterránea, en los sitios potenciales de generación de drenaje, como las canteras, las escombreras, laboreos subterráneos entre otros. La prevención y control de filtraciones de agua en balsas o diques de colas, con sistemas de colección fugas, zanjas y capas impermeables es otra de las medidas a tener en cuenta.

A pesar de las medidas mencionadas en el párrafo anterior, va a existir entre las aguas residuales un volumen perteneciente a la categoría drenaje de minas que no se puede prevenir, proveniente principalmente de agua de precipitaciones, que debe ser colectado por medio de zanjas, sistemas de desagote de mina o cantera y sistemas de colección de fugas o filtraciones de las diques de colas del mineral. Otro volumen de estas aguas residuales estará compuesto por las corrientes de efluentes de la planta de procesamiento y refinamiento del mineral. Por lo que para tratar el volumen total de aguas residuales se requiere de procesos robustos y eficientes aplicados para eliminar los contaminantes y alcanzar la calidad requerida para ser descargada al ambiente, como así también para poder ser reutilizada en el proceso gran parte de ella.

Podemos citar el caso de Canadá, que en 2009 el volumen total de agua descargada al ambiente por las industrias mineras fue de 620,4 millones de metros cúbicos. Este volumen fue más alto que el volumen de extracción de agua ($497.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$) gracias a la adición de un volumen importante de agua debido a los drenajes de mina y desagote de agua de las minas subterráneas. De este volumen podemos decir que más del 70 % fue descargado a sumideros superficiales de agua, cerca del 10 % inyectada nuevamente a acuíferos subterráneos y el porcentaje restante dispuesta en diques de evaporación. También podemos discriminar

este volumen en función de su tratamiento, cerca del 60 % fue descargado sin tratamiento, mas del 30 % con un tratamiento primario o físico, menos del 9 % con un tratamiento terciario o avanzado y cerca del 0,2 % con un tratamiento secundario o biológico (Statistics Canada, 2012).

1.2.4. Recuperación de agua en la Minería

La mejora en el diseño del sistema de agua a utilizar en minería gira entorno a dos premisas: en primer lugar, llevar adelante la operación con la más alta densidad de sólidos posible sin impactar negativamente en el proceso y, en segundo lugar, utilizar en las distintas operaciones la calidad de agua más pobre aceptable sin afectar al rendimiento del proceso. Podemos decir que los esfuerzos para mejorar el rendimiento del sistema de agua en la minería se pueden clasificar en tres conceptos, similares a los conceptos utilizados en gestión de residuos: reducir, reutilizar y reciclar (Gunson y col., 2012).

La reducción en el consumo del agua, como ya se hizo alusión en el apartado anterior, pasa principalmente por mejorar la eficiencia de los procesos con respecto a la utilización del agua, evitar pérdidas importantes como las de evaporación, utilizar pulpas del mineral con mayor concentración de sólidos, entre otros. En estos casos, la reducción del consumo de agua se ve reflejada en del proceso propiamente dicho. Pero cuando hablamos de reutilizar o reciclar, lo que se busca es lograr una reducción de consumo de agua global de la mina, es decir, intentar tomar del ambiente la cantidad justa y necesaria para los requerimientos de operación, sumado a disminuir la descarga de aguas residuales al ambiente (con objetivo final la descarga cero). En este punto cabe hacer una distinción entre reutilizar y reciclar. Reutilizar el agua, implica la posibilidad de reutilizar el agua que abandona un proceso como entrada de otro sin ningún tipo de tratamiento, en forma directa. En cambio, cuando nos referimos a reciclar el agua, estamos planteando la necesidad de un proceso de tratamiento previo a su reutilización en otro proceso.

Podemos hacer un breve comentario sobre los principales puntos en los cuales la minería centra sus esfuerzos para reutilizar el agua (Gunson y col., 2012):

- **Recolección y reutilización de agua de precipitaciones:** Teniendo un buen plan de manejo de cuencas es posible recolectar el agua de las precipitaciones y escorrentías superficiales que se generan sobre el sitio. Almacenando dicha agua en embalses o diques para su posterior uso, es posible luego ser reutilizada reduciendo significativamente el requerimiento de agua de la instalación. Existen emprendimientos mineros (Mount Isa Mines) con depósitos de hasta 20.000m³ de capacidad para recoger el agua de lluvia. Depósitos recubiertos con membranas de polietileno de alta densidad en el fondo para evitar la infiltración del agua en el terreno y con una cubierta flotante para disminuir la evaporación.
- **Reutilización del agua de desagüe de la mina:** Las minas que se encuentran por debajo del nivel freático requieren del desagüe de agua para evitar la inundación de las canteras o de los laboreo subterráneos. Esta agua tiene características generalmente adecuadas para su uso, y se utiliza comúnmente como agua de procesos. Generalmente estos volúmenes son almacenados en los mismos diques o balsas que el agua de las precipitaciones, aprovechando la capacidad de dilución del agua de lluvia.
- **Reutilización de agua de refrigeración:** Algunas instalaciones usan sistemas de refrigeración con agua en sus operaciones, como por ejemplo, intercambiadores de calor casco y tubo o de placas para enfriar equipos eléctricos, motores o sistemas de lubricación. Esta agua es generalmente limpia y se puede reutilizar para una amplia variedad de

procesos: molienda húmeda, depuradores de polvo, preparación de soluciones y mezcla de reactivos, flotación, etc.

- **Reutilización de aguas residuales de otras industrias:** Los vertederos municipales o industriales cercanos pueden disponer de aguas residuales posibles de ser reutilizadas en la industria minera. Esto puede representar un menor costo o no, pero con una visión más sustentable y responsable sobre los recursos naturales, es una acción deseable frente al uso de agua dulce o de agua de reservas subterránea. En Australia, por ejemplo, varias minas que operan en el Hunter Valley construyeron una tubería de 16km para poder compartir entre ellas sus aguas residuales. Queensland Alumina, Cadia Himine y Commodore Coal Mine en Australia usan como suministro de agua provenientes de plantas de tratamiento de efluentes urbanos cercanas a sus instalaciones.

De la misma manera podemos listar donde se pueden centrar los esfuerzos en cuanto al reciclaje del agua dentro de una instalación minera:

- **Reciclaje de aguas superficiales de diques de colas del mineral**
- **Reciclaje de aguas de infiltración de diques de colas del mineral**
- **Reciclaje de agua de espesadores primarios y secundarios**
- **Reciclaje de agua de los procesos hidrometalúrgicos**

El agua que es reciclada habitualmente es la que es drenada fuera de los diques de colas y es acumulada en balsas o diques artificiales especialmente diseñados para este fin. Del mismo modo, cualquier infiltración recogida o drenaje es enviado a estas balsas. El agua separada en espesadores (hidrociclones) de colas o relaves generalmente se recicla como agua de proceso. Equipos sedimentadores y clarificadores también son comunes dentro de las plantas de procesamiento y refinado, en los cuales el sobrenadante obtenido se recicla. En los procesos hidrometalúrgicos también se generan corrientes con posibilidad de recirculación, como las corrientes de lixiviación agotadas, de lavado o de precipitación, entre otras (Gunson y col., 2012).

Existen pocos casos registrados de plantas de procesamiento de mineral con impactos negativos en la reutilización del agua. Se han producido inconvenientes en circuitos de flotación con etapas múltiples debido a la acumulación de sales (Schumann y col., 2009). Pero a menudo, no existen impedimentos importantes en los procesos para la reutilización del agua y, en ciertos casos, puede haber importantes beneficios, tales como el reciclaje de los reactivos. En la Figura 1.4 es posible observar como sería el ciclo del agua dentro de una industria minera que aplica la metodología de reutilizar y recircular el agua.

Por seguir con el caso de Canadá, el país con mayor recirculación de agua del sector, la cantidad de agua recirculada por las industrias mineras fue en 2009 de 1.547,7 millones de metros cúbicos, que combinados con el volumen de la extracción de agua ($497,2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$), se traduce en un uso bruto del agua por el sector de 2.044,9 millones de metros cúbicos. Esto representa un tasa de recirculación de agua de 311,3 % (Statistics Canada, 2012). Por citar otro caso, en Chile, la Minera Esperanza Antofagasta recircula el 80 % del agua bruta que necesita para operar y el restante 20 % ($20 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$) lo completa con agua de mar (ICMM, 2012).

Las minas con un balance positivo de agua, por definición, descargan el exceso de agua al medio ambiente local. Sin embargo, algunas minas con un balance positivo aún pueden

requerir suministros de agua fresca para usos como agua potable o procesos especiales. Depende de las regulaciones locales, pero generalmente el agua que se descarga al ambiente requiere de mayores estándares de calidad que el agua fresca que ingresa a la mina, lo que conlleva procesos de tratamiento asociados a estas descargas (Gunson y col., 2012).

Una cuestión importante es la calidad con la que el agua ingresa, es reciclada o sale de los distintos procesos en una mina. El agua dulce o fresca siempre es preferible por sobre el agua salubre, debido a los problemas de corrosión que genera el agua salada y la influencia negativa de las sales presentes en los procesos, como por ejemplo en la formación de espuma en los procesos de flotación. La calidad del agua empleada y reciclada normalmente se pone de manifiesto en el diseño del balance de materia de las plantas, y en la práctica es controlado, por ejemplo, por análisis químico de las corrientes de purga (Dudeney y col., 2013).

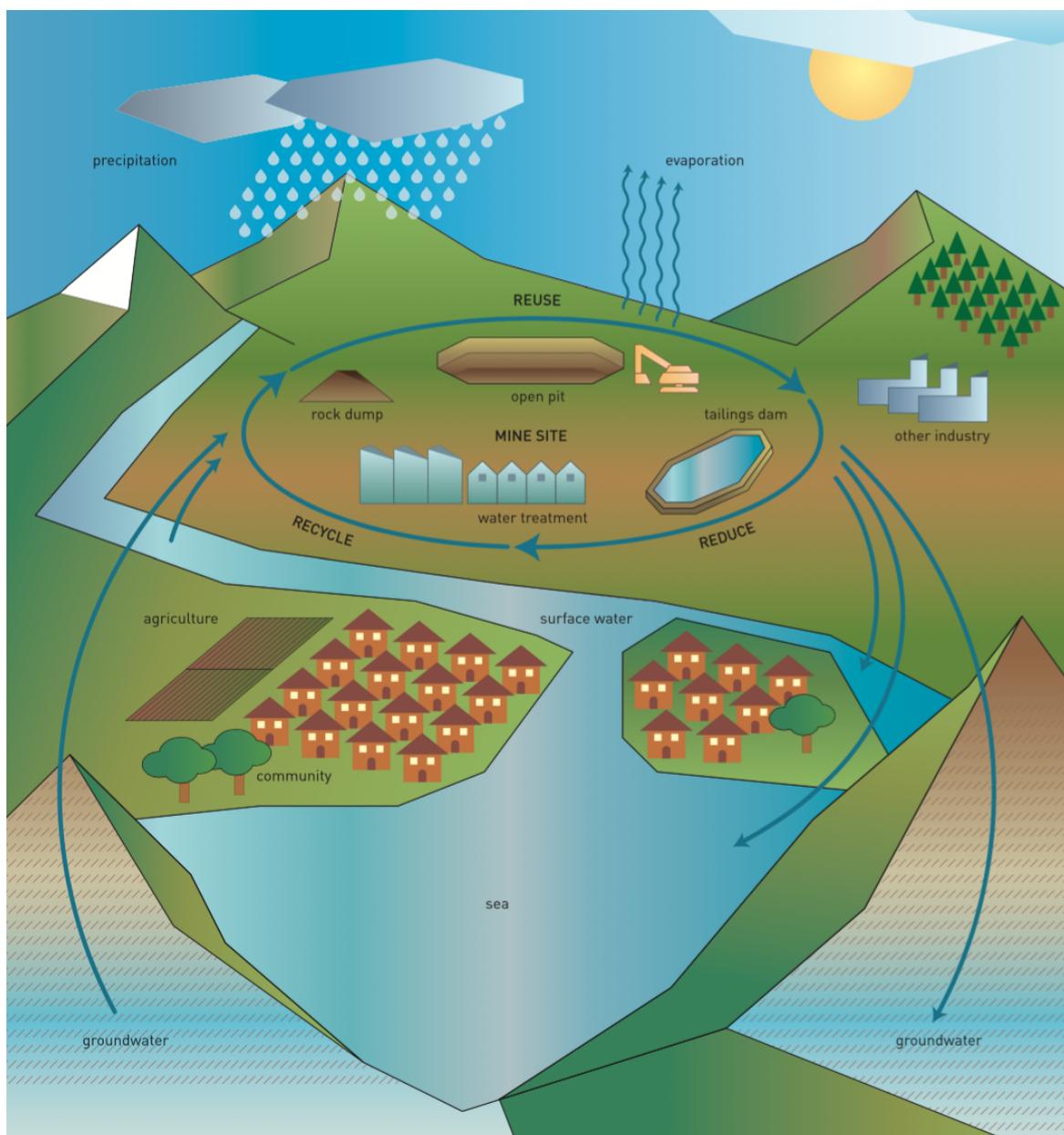


Figura 1.4. Ciclo del agua en la minería con recuperación de agua (ICMM, 2012)

En los casos en que estas aguas recuperadas no cumplan con la calidad requerida para poder ser reutilizadas en los procesos, como se mencionó anteriormente, será necesario un tratamiento previo. Podemos distinguir siete tecnologías básicas desde un punto de vista fundamental:

- *Evaporación / Condensación*
- *Precipitación / Sedimentación*
- *Filtración / Procesos con membranas*
- *Adsorción / Intercambio iónico*
- *Flotación / Extracción por solventes*
- *Tratamientos biológicos*

Estas metodologías se aplican de diversas maneras a través de procesos tales como la neutralización, coagulación, floculación, sedimentación y filtración que se aplican tradicionalmente para hacer que una corriente acuosa presente las características adecuadas para poder ser usada o reciclada al proceso, o bien ser descargada al medio ambiente (Dudeney y col., 2013).

Sumado a todo lo dicho hasta este momento sobre la importancia de la recuperación de las aguas residuales, se le puede incluir el hecho de que algunas de estas aguas contienen metales disueltos que a menudo se pierden en las descargas o en los diques de evaporación, en especial las soluciones de los lixiviados agotados. La recuperación de estos metales (y no metales) presentes en estas aguas residuales está siendo cada vez más atractiva para las empresas. Esto se debe, por un lado, al aumento de los precios de los mismos, y por el otro, a una legislación más estricta para la descarga de soluciones al ambiente (no sólo relacionadas con metales pesados disueltos, sino también con sales disueltas y condiciones de acidez) que implican un costo adicional en la eliminación de estos contaminantes. Actualmente, la industria minera busca que el tratamiento de estas aguas residuales se convierta en un proceso generador de ingresos, capaz de cubrir sus propios costos de operación (Dudeney y col., 2013).

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta los principales concepto teóricos utilizados desde el planteo del balance de agua de la mina hasta la selección de la tecnología adecuada para el tratamiento de las aguas residuales teniendo en cuenta las características del caso en estudio.

2.1. BALANCE DE AGUA EN UNA INSTALACIÓN MINERA

Un registro coherente del uso del agua en toda la instalación, incluyendo tanto la calidad como la cantidad, es un primer paso para entender las necesidades de una mina y su consumo bruto de agua. El balance de agua de una instalación minera esta compuesto por un diagrama de flujo en el que los caudales de agua entre las distintas operaciones que se llevan acabo en la minas están representadas para diversos escenarios de producción en un lapso de tiempo, como por ejemplo, todo el año. Este balance hídrico ilustra la relación entre la entrada de agua para suministro, ya se por precipitación directa, desagüe de minas y/o una estación de bombeo de una fuente natural (superficial o subterránea), y la salida de agua de la instalación, vía pérdida por evaporación, descarga al ambiente y/o a diques de evaporación. Entre esta entrada y salida es el circuito donde el agua es retenida, reutilizada, tratada y recirculada entre las distintas operaciones de la mina (Idrissy y col., 2012).

El balance de agua de la mina es una poderosa herramienta para optimizar los requerimientos, la reutilización y la descarga del agua. Lo que ayuda a minimizar la extracción de agua del ambiente al maximizar el reciclaje de la misma, con la consiguiente protección de los recursos hídricos y reducción del costo del tratamiento y de la descarga al ambiente.

Entre las distintas operaciones que pueden estar involucradas en la operación típica de una mina, podemos nombrar (Idrissy y col., 2012):

- *Desagüe de mina (Dewatering)*
- *Estación de bombeo*
- *Planta de trituración y molienda*
- *Planta hidrometarlúrgica*
- *Diques de colas de mineral*
- *Pilas de lixiviación*
- *Planta de tratamiento de aguas*
- *Diques de evaporación*
- *Sistema de recolección de precipitaciones*
- *Sistema de recolección de infiltraciones*
- *Servicios auxiliares y mantenimiento*
- *Oficinas*
- *Campamento*
- *Etc.*

La preparación de un balance de agua de la mina requiere una estrecha colaboración entre las distintas especialidades que llevan a delante la operación (mineros, geólogos, ingenieros, ecologistas, etc). Si bien el procesamiento y refinamiento del mineral puede requerir de un suministro constante de agua, en las restantes operaciones la disponibilidad y consumo de agua en el circuito variará estacionalmente. La disponibilidad de agua por desagüe de minas puede ser constante durante períodos prolongados de tiempo, pero irá variando durante una vida útil

dependiendo de la profundidad y la extensión de la mina. En climas con precipitaciones muy variable durante el año, la gestión del agua puede tornarse mas engorrosa y se deberá prever con capacidad de almacenamiento extra, mayor capacidad de recolección de escorrentías, de tratamiento y de descarga de las aguas.

2.1.1. Diagrama de bloques y Cálculo

Para desarrollar el balance de agua para una mina, es necesaria una definición clara y una comprensión de los límites del sistema en estudio, así como de la red de interconexiones de los circuitos de agua. Al inicio de un nuevo proyecto (nueva mina o proyecto nuevo en una mina existente), por lo general es difícil tener bien en claro estos circuitos, debido a la falta de información y datos precisos. Por lo que hay hacer estimaciones que luego deberán ser evaluadas y optimizadas en un proceso iterativo.

En general, es beneficioso para sistemas muy grandes y complejos dividir las operaciones en las siguientes cuatro categorías principales:

- **Área de mina (subterránea o cantera)**
- **Plantas de tratamiento y depósitos de residuos**
- **Sistemas medioambientales (tratamiento y descarga)**
- **Sistemas de agua para uso doméstico (agua potable y tratamientos)**

Cada una de estas categorías, pueden ser divididas en “unidades de gestión” más pequeñas, donde cada una de estas normalmente esta referida a una sección, área o proceso que puede ser aislado para formar un subsistema individual. El tamaño de esta unidad de gestión dependerá del nivel de detalle requerido. Cada una de estas unidades de gestión requiere por ende un balance de agua propio. Sin embargo, muchas veces estos balances no podrán ser resueltos de manera aislada y requerirán de información de otra unidad de gestión. Diferentes grados de detalle pueden ser necesarios para las diferentes unidades de gestión, en función de la importancia que esta represente para el sistema en estudio. Por lo tanto, las diferentes unidades de gestión pueden presentar diferentes niveles de detalle (Department of Water Affairs and Forestry, 2006).

El primer paso para el cálculo del balance de masa es identificar todas las corrientes de agua en el diagrama de procesos de la instalación en estudio. Esto requiere de la identificación de todas las unidades de proceso, de los usos y de las trayectorias de los flujo de agua. Por lo general es más fácil de entender e interpretar los balances de agua si está representado esquemáticamente como un diagrama de flujo de bloques. Es necesario un diagrama de bloques completo y exacto de los usos del agua en la mina para asegurar que todas las corrientes relevantes del diagramas de procesos sean incluidas en el balance.

En la Figura 2.1 podemos observar el diagrama de flujo simplificado para el caso de una mina de cobre con proceso de flotación. En la Figura 2.2 se presenta un diagrama de bloques par el flujo del agua dentro del proceso, donde podemos identificar distintas las unidades de gestión o secciones que se tuvieron en cuenta (Gunson y col., 2012).

Una vez identificadas las corrientes y dirección de los flujos de agua (Diagrama de Bloques) para resolver el balance de agua es necesario disponer de valores de caudales, volúmenes y calidades de las distintas corrientes de agua. Alguno de estos valores pueden no estar

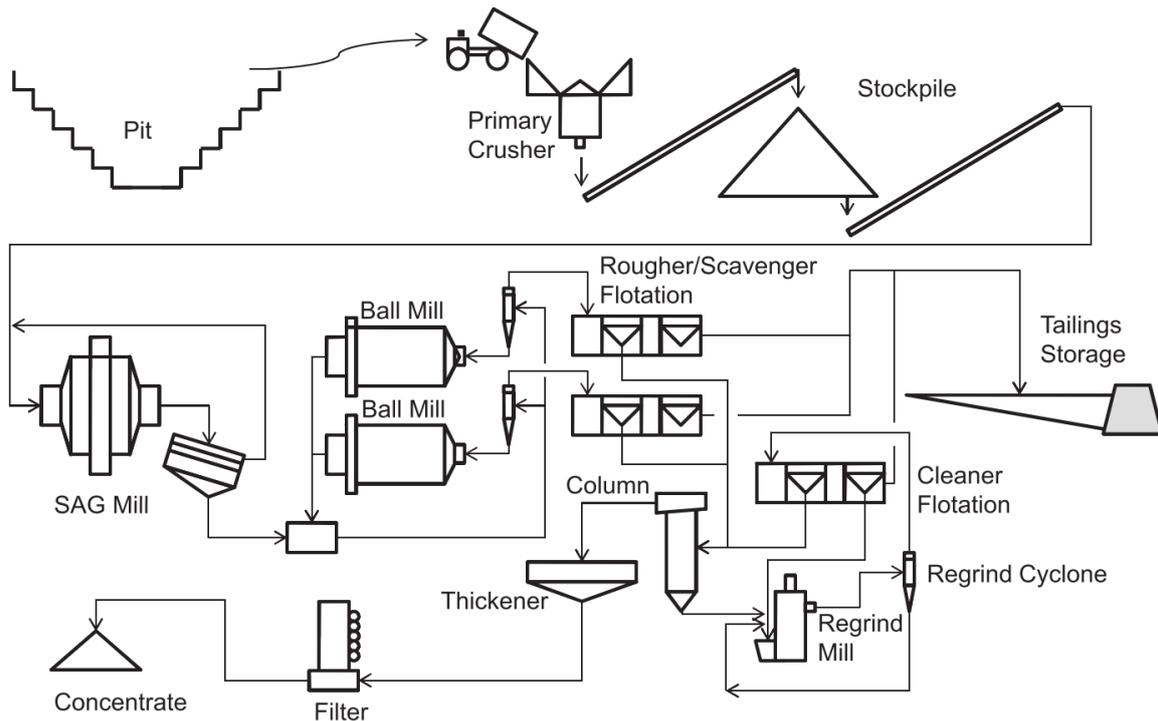


Figura 2.1. Diagrama de flujo para la extracción de cobre por flotación (Gunson y col., 2012)

disponibles o no pueden ser medidos directamente y es necesario realizar estimaciones en base a otros datos. Podemos mencionar como ejemplo para el cálculo de la evaporación del agua, el ingreso de agua derivado del desagüe de la mina o de las precipitaciones.

Finalmente, Las ecuaciones matemáticas utilizadas para resolver los balances de agua se basan en el principio de conservación de la masa, en el cual la masa de agua que entra en un sistema debe ser igual a la masa de agua que sale del sistema. Bajo la premisa de que el agua no interviene en ninguna reacción química durante el proceso, que modifique su cantidad. Esto puede ser considerado para la mayoría de las operaciones dentro de la mina, ya que el agua interviene como un medio para la fluorización de los minerales o para la disolución de los mismos. La ecuación general de conservación de la materia para el balance global de agua de la mina se puede simplificar en la siguiente ecuación (Department of Water Affairs and Forestry, 2006):

$$Masa_{Total-Entrada}^{H_2O} [Kg/s] = Masa_{Total-Salida}^{H_2O} [Kg/s] \quad (2.1)$$

En la Ecuación 2.1 se deben considerar las mediciones reales del caudal siempre que sea posible y debe incluir todas las corrientes de agua que ingresan y egresan de la mina. Si se dispone de suficiente información, los caudales no determinados, es decir, velocidades de flujo que no han sido medidos o determinados por medio de otros cálculos, se pueden calcular a partir del balance. Para resolver el balance de agua, será necesario desarrollar un sistema de ecuaciones de "n x n", donde "n" indica el número de ecuaciones o incógnitas (Department of Water Affairs and Forestry, 2006).

2.1.2. Caracterización y clasificación de las corrientes de agua en la mina

Diversos componentes y en diferentes proporciones pueden estar disueltos en las corrientes de agua involucradas en los balances de agua de la mina. Algunas corrientes pueden contener

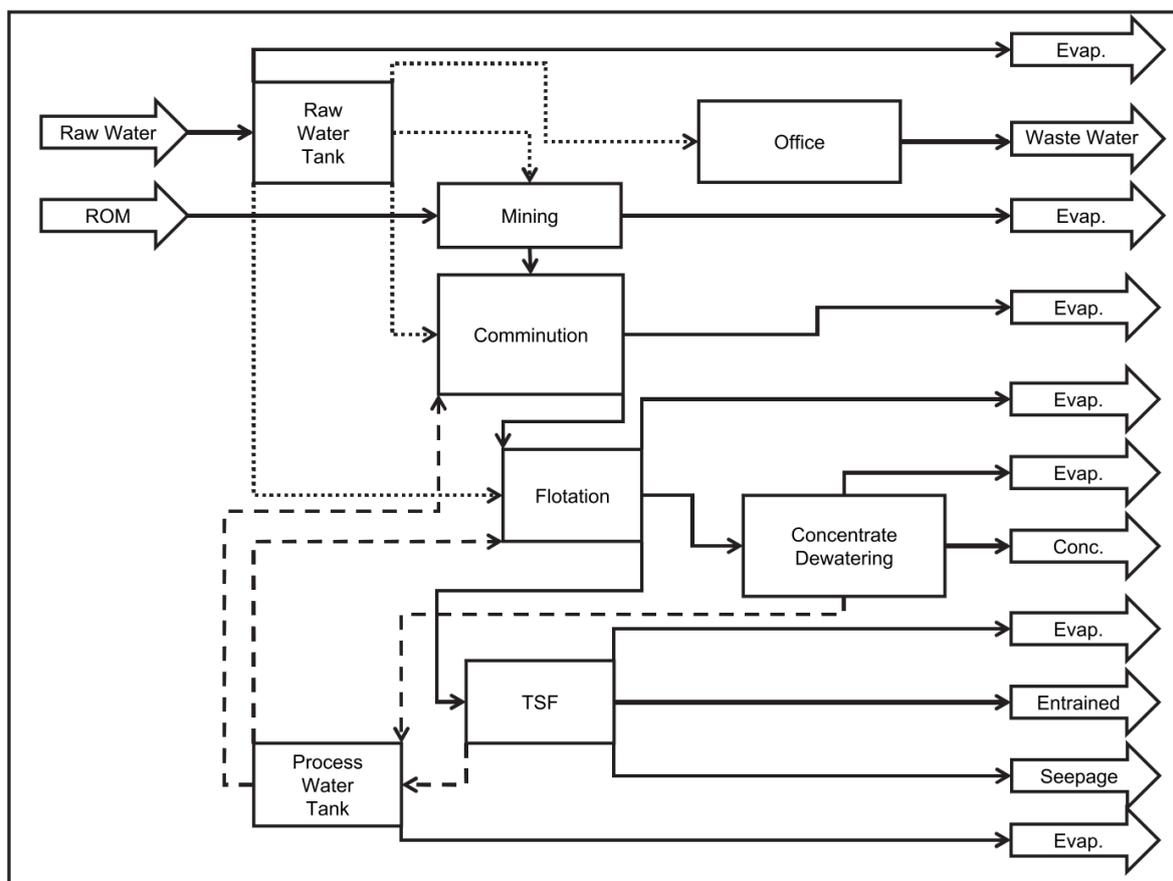


Figura 2.2. Diagrama de bloques del Balance de Agua (Gunson y col., 2012)

compuestos de nitrógeno (NO_2^- , NO_3^- , NH_3) derivados de la utilización de explosivos en los trabajos de explosión en la mina y/o de los procesos de lixiviación del mineral, como la lixiviación con cianuro en la minería del oro. Otras aguas pueden contener aditivos químicos proveniente del procesamiento de los minerales y/o de las operaciones hidrometalúrgicas. Por ejemplo, el procesamiento hidrometalúrgico de los minerales de uranio se basa en la lixiviación con ácido sulfúrico, por lo que es común encontrar aguas sulfúricas ácidas en las balsas de colas de mineral agotado. Solventes, extractantes y surfactantes orgánicos pueden ser derivados también de procesos hidrometalúrgicos. En otros casos, como en la minería del carbón, la sola presencia del yacimiento puede generar alteraciones en los acuíferos locales, provocando la disolución de sales de cloruro y sulfato contenidos en la roca. Como resultado, las aguas utilizadas en la minería del carbón pueden ser excepcionalmente salinas (Lottermoser, 2010).

Por lo tanto, dependiendo de las características del mineral extraído y los aditivos químicos utilizados en el procesamiento de dicho mineral y en los procesos de refinación posterior, diferentes elementos y compuestos pueden ser detectados en las corrientes de las instalaciones mineras. Independientemente de esto, una serie de cationes (K^+ , Na^+ , Ca_2^+ , Mg_2^+ , Al_3^+ y Si_4^+) y aniones (Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , y SO_4^{2-}) están presentes, en mayor o menor medida, en la mayoría de estas aguas, y son los principales compuestos analizados químicamente para caracterizar las corrientes de agua de la instalación. Otros componentes como los compuestos de nitrogenados, el cianuro, el carbono orgánico son analizados en función de las condiciones específicas del sitio y los requerimientos de la operación (Lottermoser, 2010).

Pueden detectarse también trazas de metales pesados y no metales los cuales generalmente

derivan del yacimiento en explotación. Estos elementos, aunque están presentes en la corteza terrestre, no se los encuentra normalmente en la naturaleza en forma soluble o biodisponible. Su concentración puede variar de forma considerable entre las distintas aguas (Department of Water Affairs and Forestry, 2007b).

Podemos listar una serie de parámetros adicionales que normalmente son analizados para completar la caracterización de las aguas que intervienen en los procesos dentro de una mina (Lottermoser, 2010):

- **Potencial de oxido-reducción (ORP) [V]:** El potencial redox de las aguas de mina es un parámetro que está íntimamente relacionado con las concentraciones de $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ en solución.
- **pH []:** Es uno de los parámetros más utilizados para caracterizar una solución. Este valor está relacionado con la concentración de protones libres en solución.
- **Conductividad Eléctrica (EC) [$\mu\text{S}/\text{cm}$]:** Mide la capacidad de la solución de conducir la corriente eléctrica, depende de la cantidad de iones presente en la solución.
- **Dureza [$\text{mg}/\text{l CaCO}_3$]:** Es la suma de iones que pueden precipitar como incrustaciones. Se expresa en miligramos por litro de carbonato de calcio, y está relacionado con la suma de iones calcio y magnesio disueltos.
- **Alcalinidad [$\text{mg}/\text{l CaCO}_3$]:** Es la capacidad que presenta una solución para neutralizar ácidos. Se determina por titulación con un ácido.
- **Acidez [$\text{mg}/\text{l CaCO}_3$]:** Es la capacidad de una solución de donar protones. Se determina por titulación con una base.
- **Sólidos Disueltos Totales (TDS) [mg/l]:** Representa la cantidad de sólidos disueltos. Se determina mediante evaporación hasta sequedad y peso del residuo.
- **Oxígeno Disuelto (DO) [mg/l]:** Representa la cantidad de oxígeno disuelto.
- **Turbidez [NTU]:** Es un análisis macroscópico, en el que se evidencia la presencia de material en suspensión en el agua. La escala es empírica.
- **Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]:** Medida relacionada con la energía interna del agua.

Entre estos parámetros listados, el pH y los TDS son los más utilizados y los que más influyen en el rendimiento de la instalación. El efecto del pH podemos decir que es indirecto, debido a la influencia que tiene sobre la solubilidad de un compuesto. Los TDS, en cambio, dan una idea de la concentración total de sales disueltas en las aguas de la mina (Department of Water Affairs and Forestry, 2007b).

Teniendo en cuenta la variación de la composición de las aguas y de sus parámetros asociados para las diferentes corrientes de agua entre una mina y otra, resulta difícil una clasificación unánime. Por lo que se han generado una serie de esquemas de clasificación de las aguas de mina que utilizan uno o varios parámetros mencionados, según la practicidad en cada caso (Lottermoser, 2010):

- **Cationes y aniones principales:** Esta es una técnica estándar para caracterizar las aguas subterráneas y superficiales. Es necesario conocer la concentración de los principales cationes (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y aniones (Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , y SO_4^{2-}). Luego estos valores

son presentados en un diagrama triangular (diagrama de Piper) para caracterizar las aguas de acuerdo a la abundancia sus cationes y aniones.

- *pH*: Es un esquema básico de niveles según el rango de pH en el que se encuentre el agua. En la Tabla 2.1 se distinguen los diferentes niveles utilizados para aguas de minas.
- *pH y concentración de Fe^{2+}/Fe^{3+}* : Esta técnica de clasificación requiere el conocimiento del pH de la solución así como la concentración de Fe^{2+}/Fe^{3+} disueltos.
- *pH vs metales disueltos*: Las agua de minas pueden ser clasificadas de acuerdo al pH y a la suma de ciertos metales básicos disueltos (Zn, Cu, Cd, Pb, Co, Ni).
- *Alcalinidad vs acidez*: Este esquema ha sido diseñado para permitir la clasificación de las aguas de mina en función de su capacidad para ser tratadas utilizando métodos de tratamiento pasivo. Se requiere el conocimiento de la alcalinidad y la acidez de las aguas, parámetros determinados por titulación.
- *Alcalinidad vs acidez y concentración de sulfatos*: En esta clasificación, además de las dos anteriores, se tiene en cuenta la concentración de sulfatos disueltos en las aguas de las minas.
- *Salinidad*: En esta clasificación considera que la concentración de sales en las aguas es igual a la concentración sólidos disuelto totales (TDS). Las aguas son clasificadas según el valor de dicho parámetro.

Tabla 2.1. Clasificación de las aguas residuales según su acidez. Fuente: (Lottermoser, 2010)

Clase	Características	
Muy Ácida	pH <1	Alta acidez derivada de la oxidación de los sulfuros y reacciones de hidrólisis. Aguas en contacto con minerales muy enriquecidos en pirita.
Ácida	pH <5.5	Acidez generada derivada de la oxidación de sulfuros de minerales ricos en hierro. Son las que se encuentran comúnmente en las operaciones mineras extractivas (oro, carbón, uranio).
Neutra a Alcalina	pH <6 – 10	Altos niveles de alcalinidad generados a través de la disolución de los carbonatos, óxidos alcalinos, hidróxidos y silicatos. Comúnmente se encuentran en minas de diamantes, oro, uranio, hierro, carbón y minas de silicatos
Salinas	pH variable	El pH depende de la concentraciones de iones en solución. Asociado a la extracción de carbón y minerales industriales, incluidas las evaporíticas (potasa, halita y borato).

2.1.3. Salinidad

La presencia de sales en las corrientes de agua de las minas es normal y esta vincula, en principio, a la propia fuente de suministro de agua a la mina, pero también a la disolución de sales que puede ocurrir durante las etapas de procesamiento y refinado del mineral. Por lo que,

la salinidad como parámetro es muy importante para la caracterización de las aguas, y es muy utilizado para realizar el balance de agua en la mina.

Podemos dividir a las sales presentes en las aguas de la mina en dos grandes grupos (Department of Water Affairs and Forestry, 2007b):

- **Sales solubles principales:** Este grupo incluye a sulfatos, cloruros y carbonatos de Ca, Mg, Na y K. Estas sales son relativamente abundantes en la corteza terrestre y debido a su alta solubilidad están presentes, en mayor o menor medida, en prácticamente todas las aguas en forma natural. Son elementos esenciales para la vida y sólo exhiben efectos tóxicos a concentraciones elevadas. También son los principales causantes de los procesos de corrosión y de incrustaciones en los equipos de planta.
- **Sales solubles secundarias:** Este grupo incluye a las sales de F, Br, I, fosfato, nitrato y nitrito. Estas sales son también elementos esenciales, pero están presentes a niveles de concentración más bajos en ambientes naturales y tienen una toxicidad mayor que las anteriores.

Al igual que con el balance de agua de la mina, es posible aplicar el principio de conservación de la materia para determinar el balance de sales disueltas en estas corrientes (Ecuación 2.2).

$$Masa_{Total-Entrada}^{Sal} [Kg/s] = Masa_{Total-Salida}^{Sal} [Kg/s] \quad (2.2)$$

Donde:

$$Masa_i^{Sal} [Kg/s] = Caudal_i [m^3/s] * Concentración_i^{Sal} [Kg/m^3] \quad (2.3)$$

Cada una de las corrientes de agua involucradas en el balance debe tener especificada una concentración de sal y un caudal asociado, para poder definir su carga total de sales (Ecuación 2.3). Por lo tanto, dicha concentración de sal puede referirse a la concentración de una sal específica o a la concentración total de sales disueltas (TDS). En general, en las etapas de desarrollo de nuevos proyectos mineros, es muy común el uso del parámetro TDS como concentración de sal en el balance de agua de la mina, con lo que se agilizan los cálculos y disminuyen los costos de análisis. En minas en operación un análisis más específico es necesario, en especial para compuestos perjudiciales para la salud o el ambiente, o compuestos con interés económico (Department of Water Affairs and Forestry, 2006).

Cuando una sal es seleccionada en forma individual para hacer el balance, no hay que perder de vista su ecuación de equilibrio en agua, por lo que hay que tratar de usar sales conservativas como el Na, Cl, etc para evitar errores de cálculo. Elementos como calcio, fosfato, nitrato, sulfatos y metales pesados entre otros se consideran como sales no conservativas, ya que suelen ser objeto de metabolización biológica o precipitación química. Estos elementos no se pueden utilizar en un equilibrio para la sal a no ser que se tengan en cuenta las ecuaciones involucradas en estos procesos. Aunque los sólidos disueltos totales (TDS) incluyen este tipo de sales no conservativas, se utiliza a menudo para el balance de agua y sal de la mina, debido a que el error asociado tiende a ser bajo (Department of Water Affairs and Forestry, 2006).

Es muy común encontrar valores de salinidad expresados en función de la conductividad eléctrica (CE), ya sea en la bibliografía académica o en la industria. El uso de la CE como medición de la salinidad ha sido utilizado, con gran aceptación, basado principalmente en la practicidad a la hora de hacer la medición, y en la teoría de que las sales disueltas son las responsables de la conducción de la electricidad dentro de la solución. Por tal motivo se han desarrollado distintos conceptos de salinidad para diferenciar el método de medición, aplicado

principalmente al agua de mar en oceanografía o a las aguas salobres en hidrogeología. Se ha definido como **Salinidad Práctica 'S'** (*Practical Salinity*) a la que es función de la conductividad, temperatura y presión, y como **Salinidad Absoluta 'S_A'** (*Absolut Salinity*) a la derivada de la medición de la concentración de sales disueltas por evaporación. Finalmente, en los últimos años se ha desarrollado un nuevo concepto llamado **Salinidad de Referencia 'S_R'** (*Reference Salinity*) con la idea de eliminar las diferencias en el resultado entre las anteriores, y así poder establecer mejor las propiedades termo-físicas de la solución. Este concepto fue desarrollado principalmente para su aplicación con agua de mar (Millero y col., 2008; Nayar y col., 2016).

En la industria, principalmente en las relacionadas con desalinización de agua mar, en cambio buscando la practicidad, han utilizado el concepto de salinidad en forma ambigua teniendo en cuenta la relación expresada en la Ecuación 2.4. En forma general suele utilizarse el valor de **K = 0,7**, pero debido a que ambas propiedades dependen de distinto factores con el fin de evitar errores en la conversión, se han obtenido en forma experimental valores promedios de K en función de la CE a 25°C, para los procesos de membranas (Tabla 2.2). En la Tabla 2.3 se presentan valores típicos de salinidad para distintas aguas en función de la CE y de TDS, utilizando estos valores de K promedio (Walton, 1989).

$$\text{Salinidad}(S)[\text{mg/l}] = \text{TDS}[\text{mg/l}] = K * \text{CE}[\mu\text{S/cm}] \quad (2.4)$$

Tabla 2.2. Valores sugeridos del factor K para diferentes aguas industriales. Fuente: (Walton, 1989)

Tipo de agua	CE ₂₅ μS/cm	K factor
Destilada	1 – 10	0,50
Permeado (RO)	300 – 800	0,55
Agua de Mar	45.000 – 60.000	0,70
Rechazo (Salmueras)	65.000 – 85.000	0,75

Finalmente, cabe mencionar que es posible encontrar valores de salinidad expresados en función de la masa (g/Kg o mg/Kg) lo cual en principio sería una medición mas correcta de los sólidos disueltos totales (TDS), pero teniendo en cuenta que para la mayoría de los casos se trabaja para concentraciones muy diluidas, y a temperatura y presiones estándar se considera despreciable el efecto de la densidad del agua

Tabla 2.3. Valores típicos de salinidad para diferentes tipos de agua. Modificado: (Walton, 1989)

Tipo de agua	CE ₂₅ μS/cm	TDS mg/l
Ultra pura	0,05 – 0,50	0,025 – 0,250
Destilada	1 – 10	0,50 – 5,00
Lluvia	5 – 50	2,50 – 25,0
Potable	50 – 1.000	25 – 500
Salobre (<i>Brackish</i>)	2.000 – 20.000	1.000 – 10.000
Salina	20.000 – 40.000	11.000 – 22.000
Agua de Mar	40.000 – 60.000	28.000 – 42.000
Salmueras	>60.000	>45.000

2.1.4. Problemas con la reutilización del agua

El concepto, planteado en el capítulo anterior, de que la calidad del agua para los distintos procesos deber ser tan pobre como sea posible es fundamental a la hora de evaluar la reutilización del agua. El agua reusada o recirculada debe tener una calidad suficiente como para que no altere los procesos en los que se va a reutilizar, ni los productos finales.

Durante el refinamiento del mineral, mediante procesos hidrometalúrgicos, se busca obtener la mayor recuperación de minerales con interés económico. Esto ha dado lugar a técnicas de recuperación más complejas, la mayoría de las cuales implican un uso intensivo y reciclaje del agua. Estas operaciones requieren un control más estricto sobre la calidad del agua en las corrientes involucradas con el fin de mantener la eficiencia del proceso y evitar problemas de funcionamiento, como corrosión, incrustaciones o ensuciamiento (Department of Water Affairs and Forestry, 2007b).

El aumento o acumulación de sales disueltas debido a la reutilización del agua, puede traer, como se mencionó anteriormente, problemas de rendimiento en proceso de flotación (Schumann y col., 2009), así como también generar deposición de sales en sectores donde se puedan dar las condiciones adecuadas. En los sistemas de refrigeración, calefacción y producción de vapor, la variación de la temperatura puede influir en la acumulación de algunas sustancias y esto provocar un aumento en las tasas de corrosión y de generación de sarro. La evaporación en sistemas de refrigeración abiertos y en calderas aumenta el contenido de sólidos disueltos en el agua, lo que puede favorecer la formación de incrustaciones o corrosión. Las aguas de sistemas de refrigeración abiertos al ambiente presentan condiciones óptimas para la formación de microorganismos, por lo que especial cuidado se debe tener al momento de la reutilización de estas aguas, no solo por la generación de ensuciamiento en cañerías y equipos, sino también por la proliferación de agentes tóxicos para la salud o el ambiente (Department of Water Affairs and Forestry, 2007b).

Como regla general podemos decir, que una agua residual puede ser reutilizada en otro proceso solo si su calidad es inferior a la calidad de salida del nuevo proceso, o si previamente se le aplica el tratamiento adecuado para alcanzar los requisito de calidad de este nuevo proceso.

2.2. CORRIENTES RESIDUALES EN LA MINERÍA DEL URANIO

La diferencia principal entre la minería del uranio y el resto de la industria minera es la radiactividad natural que presentan los minerales, debido principalmente al contenido de uranio natural y a sus productos de decaimiento. Como es de esperar sus residuos, tanto sólidos, como acuosos y en menor medida gaseosos, también presentan niveles de radiactividad superiores a los naturales. Esta propiedad diferencia a los residuos de la minería del uranio de otros tipos de residuos mineros. Por ejemplo, desechos de las minas de oro contienen cianuro y el cianuro pueden ser destruido mediante técnicas naturales o artificiales. Por el contrario, estos isótopos radiactivos presentes en los residuos de la minería del uranio no pueden ser destruidos por reacciones químicas, barreras físicas o métodos de ingeniería sofisticados. Por lo tanto, las estrategias aplicadas en la gestión residuos en las minas de uranio tienen que asegurar que estas sustancias radiactivas no sean liberadas al ambiente.

Por tal motivo, es normal encontrar en aguas residuales generadas en instalaciones mineras radionucleídos, metales pesados, metaloides y otros componentes. En estas instalaciones, estas agua pueden provenir de distintos lugares, como: molienda húmeda, agua de desagüe de

minas subterráneas o canteras a cielo abierto, sistema de colectores de fugas de diques de colas, pilas de lixiviación o escombreras de mineral marginal. Agua de las mismas características también se produce en minas con sistemas de lixiviación in situ (ISL). Todas estas aguas residuales requieren de un tratamiento previo a su descarga al ambiente, por lo que su gestión se logra a través de la recolección, tratamiento, reutilización y eliminación. Las aguas residuales de las distintas instalaciones son recolectadas y canalizadas hacia distintos estanques de retención, donde según sus características son tratadas para disminuir la concentración de algunos componentes o reutilizadas directamente. La disposición final se realiza generalmente en diques de evaporación, y en caso de alcanzar la concentración adecuada por riego sobre tierra o descarga a una fuente superficial (Lottermoser, 2010).

La gestión de estas aguas residuales se logra a través de la recolección, reutilización y eliminación. Como se mencionó el agua se recolecta de las canteras o labores subterráneas, de la planta de procesamiento físico, de las operaciones hidrometalúrgicas, de las balsas o diques de residuos sólidos, pilas de lixiviación en pilas y pilas de mineral, y se canaliza hacia los estanques de retención. El agua no contaminada puede eliminarse por evaporación, el riego de tierras o de descarga mientras que el agua contaminada requiere tratamiento antes de la descarga.

En la mina de uranio Ranger en Australia, por ejemplo, el agua residual recolectada es segregada en función de la fuente y la calidad. En base a esto, dependiendo de la calidad, el agua limpia se descarga directamente al medio ambiente mediante riego por aspersión o a través de humedales artificiales, el agua con una concentración moderada de contaminantes a diques de colas o de evaporación, y el agua con una contaminación significativa enviada a procesos de tratamiento específicos (IAEA, 2009).

La reutilización de las aguas asociadas a las colas de mineral (con o sin tratamiento) es un proceso habitual en este tipo de instalaciones. La mina de uranio Rossing en Namibia recicla el agua ácida a los equipos de trituración y molienda debido a la escasez de agua de la zona. En Ranger (Australia) estas aguas residuales son recicladas para reducir la extracción de agua de fuentes subterráneas y para reducir al mínimo la pérdida por evaporación en los estanques. La mina Olympic Dam en Australia no recicla el agua ácida al circuito de molienda debido a requisitos del proceso, pero reutiliza estas aguas para el proceso de lixiviación: después de una molienda húmeda, la pulpa diluye hasta la densidad deseada con aguas residuales antes de ingresar en los tanques de lixiviación (IAEA, 2009).

2.2.1. Comportamiento del uranio en solución

El uranio es un elemento sensible al estado de oxidación-reducción de la solución y en aguas naturales se lo puede encontrar como iones U^{4+}/U^{6+} en equilibrio. La abundancia de uno u otro de estos iones está influenciada por la presencia de agentes complejantes y por el pH y ORP de la solución.

En condiciones reductoras y con pH ácido, el uranio está presente en el agua como la especie U^{4+} . En ausencia de agentes ligantes, la concentración de U^{4+} en solución no supera las ppb ($\mu\text{g}/\text{l}$). En condiciones oxidantes, la especie U^{4+} se oxida a U^{6+} la cual es mucho más soluble, estable y con mayor movilidad formando el ion uranilo (UO_2^{2+}). La solubilidad se ve reforzada por la formación de complejos con sulfato, carbonato, hidróxido, fluoruro, cloruro, nitrato, fosfato o ligandos orgánicos. Las concentraciones de las especies U^{6+} en aguas subterráneas o superficiales en condiciones oxidativas alcanzan decenas o incluso miles de ppm (mg/l), dependiendo del pH y de las concentraciones. Con pHs alcalinos y concentración elevada de

bicarbonato el uranio se ve favorecido formando compuestos estables de carbonatos de uranilo. En contraste, las especies predominantes en soluciones ácidas son el complejo de ión de uranilo y de sulfato de uranio. Por lo tanto, las aguas residuales en una mina de uranio, ya sean ácidas o alcalinas en condiciones oxidativas pueden presentar concentraciones significativas de uranio disuelto (Lottermoser, 2010).

Las aguas subterráneas y superficiales naturales contienen varios ppb de uranio, en cambio, en zonas mineralizadas las concentraciones de uranio en estas aguas pueden ser mucho más elevadas. En las minas de uranio, la lixiviación natural de los minerales de uranio puede ser importante, elevando las concentraciones de uranio. Los lixiviados de los residuos mineros de uranio pueden llegar a contener decenas de ppm de uranio. Estos lixiviados pueden también presentar elevados niveles de torio y radio-226. El torio es menos soluble que el uranio en todas las condiciones y una vez en solución, coprecipita fácilmente con hidróxidos de hierro y manganeso a pH superiores a 5. El Ra²²⁶, es un elemento de decaimiento del uranio. Este isótopo de radio está comúnmente presente en las aguas de las minas de uranio, ya que es soluble y móvil en condiciones ácidas, sin embargo, altas concentraciones de sulfatos en aguas ácidas limitan su solubilidad, coprecipitándolo junto a sulfatos como los de bario y calcio (Lottermoser, 2010).

La precipitación del uranio disuelto se consigue principalmente a través de la destrucción de los complejos de uranilo. Por lo tanto, es posible precipitar y disminuir la concentración de uranio en solución mediante: cambios de pH, coprecipitación, adsorción en arcillas, disminución del ORP, mediante actividad microbológica, entre otras técnicas.

2.2.2. Aguas residuales de los diques de colas de mineral

Las colas de mineral de uranio son dispuestas normalmente en balsas o diques como una suspensión del mineral agotado. La parte sólida puede ser subdividida a su vez en función del tamaño de partícula en limos y arenas. Estos sólidos decantan en las balsas y los líquidos se puede recuperar para su reutilización en los procesos de extracción de uranio. El pH de estos líquidos en colas ácidas es generalmente menor que 4, mientras que el pH de los líquidos de residuos alcalinos es generalmente mayor que 9. En estas condiciones se favorece la disolución de los minerales presentes en la ganga, generando residuos líquidos con elevadas concentraciones de sales disueltas, metales y radionúclidos. En la Tabla 2.4 se puede observar las composiciones típicas para las aguas residuales de las colas de mineral para cada tipo de lixiviación.

Tabla 2.4. Composiciones típicas de aguas en diques de colas de mineral . Modificado: (Lottermoser, 2010)

Lixiviación	Ácida	Alcalina
pH	1,2 – 2,0	10 – 10,5
U (mg/l)	10 – 100	-
Ra ²²⁶ (pCi/l)	20 – 7.500	200
TDS (mg/l)	>10.000	>100.000
Iones presentes	Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , PO ₄ ³⁻	CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻

Si la neutralización no se ha aplicado a las colas del mineral previo a su disposición en el depósito, los líquidos de colas son típicamente soluciones ácidas, salinas enriquecidas en metales pesados, metaloides, radionúclidos, hierro, manganeso, aluminio, metales alcalinos y alcalinos térreos (Na, K, Ca, Mg), sulfatos, cloruros, fluoruros, productos químicos del procesamiento. Estos líquidos están comúnmente en equilibrio con sales secundarias, tales

como el yeso y los sulfatos de aluminio, que precipitan sobre los residuos sólidos (Lottermoser, 2010).

En algunos sitios mineros, los residuos de la lixiviación ácida se neutralizan parcial o totalmente con cal antes de su descarga a los depósitos. Las colas quedan de esta manera saturadas con sulfato de calcio. La neutralización puede dar lugar a la precipitación de yeso y de numerosos elementos que estaban en solución en el agua de proceso (As, Ni, Fe, Cu, Mn, Mg). Los precipitados químicos son principalmente hidróxidos de metal, yeso y arseniatos. Los procesos de adsorción en fases amorfas y de coprecipitación de radioisótopos, metales y metaloides son también observados, por lo que se observa la disminución de la concentración de los elementos disueltos, en especial de los radioisótopos (Lottermoser, 2010).

En estos depósitos de colas, puede ocurrir también la neutralización natural de líquidos de colas a través de la reacción de estos líquidos con los residuos sólidos. La disolución de los minerales de carbonato y la captación de iones de hidrógeno por las arcillas presentes en los residuos sólidos pueden actuar como *buffers* y reducir el pH de los líquidos. Estos residuos líquidos ácidos pueden reaccionar con aluminosilicatos, generando compuestos porosos que tienden a actuar como sumideros de adsorción para los radioisótopos y metales pesados, favoreciendo su fijación.

2.2.3. Aguas residuales de los procesos de extracción hydrometalúrgicos

Dependiendo del proceso de extracción a utilizar las estas aguas pueden tener distintos compuestos, entre los que podemos listar al ácido sulfúrico, sulfatos, carbonatos, cloruros, óxido de calcio, óxido de magnesio, hidróxido de sodio, permanganato de potasio, sulfato de cobre, cianuros, óxidos de manganeso, compuestos nitrogenados (amonio, amoníaco, ácido nítrico) y disolventes orgánicos (querosene, alcoholes, etc). Por lo tanto, las aguas residuales de estos procesos tienden a tener contenidos elevados de radionúclidos, metal, metaloide, así como sulfato, carbonato, cloruro, calcio, magnesio, sodio, manganeso y compuestos nitrogenados (NO_3^- , NH_3 , NH_4^+) (Lottermoser, 2010).

La presencia de amoníaco en aguas residuales es un problema importante, debido a los impactos ambientales adversos que genera en la descarga, a las complicaciones en el proceso de eliminación y a los costes asociados en la pérdida del reactivo. Los procesos de eliminación requieren no solo de tratamientos físicos como ablandamientos o procesos con membranas (osmosis inversa), sino también procesos biotecnológicos para alcanzar las concentraciones permitidas para su descarga al ambiente. Corrientes residuales con concentraciones del orden de las 1000ppm (mg/l) pueden ser comunes en las operaciones de precipitación. En algunas minas de uranio, como la de Rabbit Lake (Canada), han modificado los procesos para eliminar del circuito el amoníaco. En este caso, se usa un ácido fuerte en lugar de sulfato de amonio, en la etapa de extracción por solventes para la purificación y concentración del uranio, junto con la precipitación de uranio con peróxido de hidrógeno y el uso de magnesia para el control de pH. En otras instalaciones, como la de Key Lake (Canada), se utilizan procesos de cristalización de sulfato de amonio para la recuperación del producto. Las aguas residuales conteniendo amoníaco disueltos son tratadas en un equipo evaporador-cristalizador de cuádruple efecto (IAEA, 2009).

2.3. TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN LA MINERÍA DEL URANIO

Como ya se mencionó en los apartados anteriores, para recuperar y reutilizar las aguas residuales, una parte de estas puede requerir un tratamiento adecuado para alcanzar los requerimientos mínimos necesarios para volver a ingresar a la planta. En las minas de uranio, en particular, los tratamientos además son necesarios para disminuir la concentración de radionucleídos presentes naturalmente en el mineral. Se aplican distintos tratamientos a estas aguas residuales con radionucleídos, principalmente en los puntos de descarga de agua al ambiente donde la concentración de los mismos debe ser mínimas y cumplir con la regulación presente. Más allá de los puntos de descarga, el aumento de las concentraciones de estos compuestos radiactivos gracias a la recirculación del agua sin tratamiento puede generar problemas relacionados con el riesgo del personal a la exposición a dosis más altas de radiación. Además, como medida preventiva en este tipo de instalaciones, la idea es disminuir al máximo la concentración de compuestos radiactivos en agua de reservorios, balsas o diques de evaporación para evitar su dispersión al ambiente ante algún evento inesperado. En base a todo lo expuesto hasta aquí, es muy común en las minas de uranio que la mayoría de las corrientes residuales de los procesos tengan algún tratamiento en menor o mayor grado (IAEA, 2009).

La elección de una tecnología de tratamiento de agua depende específicamente del sitio y de la instalación en estudio. Para cualquier problema de tratamiento de agua, siempre hay un número de diferentes tecnologías de tratamiento que podrían ser aplicadas. Es posible hacer una selección preliminar de la tecnología a aplicar en base a la teoría, experiencia y aplicaciones históricas, pero finalmente será necesario un desarrollo experimental en las condiciones más semejantes a la realidad del proceso para la validación del tratamiento seleccionando (Department of Water Affairs and Forestry, 2007a).

Podemos clasificar a las técnicas de tratamiento de aguas en dos grandes grupos (Lottermoser, 2010):

- **Tratamientos activos:** Estos sistemas de tratamiento requieren la adición de reactivos químicos, mantenimiento y supervisión constantes, y dispositivos mecánicos de operación continua para mantener las condiciones de operación.
- **Tratamientos pasivos:** Los métodos pasivos utilizan los procesos químicos y biológicos naturales, así como los flujos naturales de agua, para reducir las concentraciones de metales disueltos y neutralizar la acidez de estas aguas. Tales métodos requieren poco o nada de los reactivos, con un menor grado de mantenimiento y vigilancia, y un mínimo de equipos mecánicos.

La elección entre tecnologías de tratamiento de aguas activas o pasivas depende en gran medida del período en el ciclo de vida en el que se encuentre la mina. Por ejemplo, en una mina cerrada o abandonada, la elección es obviamente de un tratamiento pasivo si las condiciones del sitio así lo permiten. Los tratamientos activos, son especialmente recomendados para las etapas de exploración y explotación de una mina. Es posible combinar o integrar tratamientos activos y pasivos en una planta de tratamiento de agua, aunque en la práctica es poco habitual, debido a la pérdida en la ventaja principal de un tratamiento pasivo, la de reducir los costos de operación (Department of Water Affairs and Forestry, 2007a).

Tanto las tecnologías de tratamiento de aguas activas, como las pasivas, son capaces de

hacer frente a la mayoría de los compuestos contaminantes asociados con las aguas de mina. Los tratamientos de agua activos son capaces de obtener una mejor calidad de agua con un alto grado de rendimiento, en comparación con los tratamientos pasivos. Así mismo, los tratamientos pasivos tienen algunas limitaciones con respecto a los compuestos que se desea eliminar de las aguas. Si el objetivo principal del tratamiento del agua es la eliminación de sólidos disueltos totales (TDS), conductividad eléctrica (CE) o sales conservativas como Na o Cl, los tratamientos pasivos no son los más adecuados, debido a que no se alcanzan buenos rendimientos. Las tecnologías de tratamiento pasivo también presentan limitaciones con respecto a los caudales de trabajo, obteniendo resultados óptimos en el rango de 100 y 2.000 m³/día, por lo que normalmente no se recomienda su aplicación para caudales superiores a los 5.000 m³/día (Department of Water Affairs and Forestry, 2007a). En la Tabla 2.5 se presentan un cuadro comparativo entre las dos técnicas.

En base a toda esta información, podemos decir que los tratamientos activos de las aguas residuales son los más recomendados y aplicados, cuando la mina está en operación, con la finalidad de re-acondicionar grandes caudales de agua para poder ser reutilizados nuevamente en los procesos. Por este motivo estos tratamientos serán los que estudiaremos a continuación.

2.3.1. Tratamientos activos de aguas residuales en minería

La eliminación de la mayoría de los sólidos disueltos (TDS) puede llevarse adelante por ósmosis inversa (RO), electrodiálisis (ED) o por resinas de intercambio iónico (IX) con buena eficiencia. Como resultado se produce una corriente de salmuera concentrada que debe ser dispuesta de una manera apropiada o tratada adicionalmente en procesos térmicos. La evaporación térmica se utiliza sólo para el tratamiento de corrientes que contienen altos niveles de sales disueltas, tales como sulfato de calcio, sulfato de sodio y cloruro de sodio. En estos sistemas de tratamiento térmico se generan efluentes líquidos que pueden ser descargados

Tabla 2.5. Comparación entre tecnologías de tratamiento activas y pasivas. Fuente: (Department of Water Affairs and Forestry, 2007a)

Criterio	Tratamiento Activo	Tratamiento Pasivo
Período de vida de la mina	Exploración, construcción, operación y pos-cierre (para caudales elevados)	Desmantelamiento, cierre y pos-cierre
Costos	Altos costos de capital y de operación	Costo de capital medio y bajo costo de operación
Energía	Requiere energía mecánica o eléctrica	No requiere suministros externos. Utiliza fuentes naturales de energía (solar y gravitatoria)
Supervisión y mantenimiento	Continuo	Periódico
Caudales	Altos caudales, operación en módulos	<5000 m ³ /día (óptimo 100 – 2000 m ³ /día)
Requerimiento de agentes químicos externos	Alto, agregado continuo	Bajo, agregado en forma pasiva
Capacidad de tratamiento	Puede eliminar todos los compuestos	Utilizado para eliminación de ácidos, metales y sulfatos. No aplicable para disminuir TDS, EC, Na y Cl.
Calidad final del agua	Muy alta calidad	Baja calidad

al ambiente y residuos sólidos que deben de disponerse en sitios adecuados para tal fin (Department of Water Affairs and Forestry, 2007a).

Entre los metales recalcitrantes podemos mencionar al arsénico, molibdeno, antimonio, cromo y selenio. Estos metales no son precipitados en los procesos de neutralización convencionales y deben ser eliminados mediante métodos alternativos. Para lidiar con estos metales, generalmente se le añade a la precipitación química una etapa previa de oxidación o reducción. Los lodos resultantes de estos procesos deben ser dispuestos en instalaciones especialmente diseñadas o enviados repositorios de residuos peligrosos. Para el caso especial del radio, el método más eficaz y probado para su eliminación es la precipitación con bario. Los lodos generados en este proceso también deben ser colocados en embalses artificiales especialmente construidos (Department of Water Affairs and Forestry, 2007a).

Para los procesos de neutralización de soluciones ácidas con metales disueltos existen una serie de opciones que incluyen la precipitación química usando una base (cal), la precipitación de sulfuros mediante agentes químicos (bario o aluminio) o mediante la reducción de sulfato por tratamiento biológico. Generalmente, estos procesos de precipitación se completan con una etapa de pulido final, con espesantes y floculantes, para eliminar las concentraciones residuales de metales y radionúclidos (Department of Water Affairs and Forestry, 2007a).

Como se puede observar, existen numerosos procesos de tratamientos activos para aguas residuales que pueden ser utilizados en una instalación minera. La elección del tratamiento va a depender de las características de las aguas a tratar (calidad y cantidad), los objetivos de tratamiento y el costo total asociado. En este contexto, teniendo en cuenta lo mencionado en la Sección 2.2 sobre las características de las corrientes y el objetivo general del trabajo sobre la recuperación y recirculación de agua buscando disminuir su consumo, podemos considerar los siguientes procesos como los más utilizados en la minería del uranio para tal fin:

Neutralización, Precipitación y Floculación

En la mayoría de los emprendimientos mineros la práctica más común para el tratamiento de las soluciones ácidas residuales de los procesos de lixiviación es la neutralización con cantidades importantes de reactivos alcalinos, como el carbonato de calcio, óxido de calcio, hidróxido de calcio entre otros. Esta técnica no solo neutraliza la solución, sino que también reduce la cantidad de metales pesados y radionucleídos disueltos. Como resultado, cantidades de lodos con alta concentración de metales pesados y radionucleídos precipitan. Estos lodos deben ser gestionados de manera adecuada, la práctica más común es depositarlos en los diques justo a las colas del minera (Kesieme y col., 2014).

Cada uno de los reactivos utilizados en la neutralización presenta ventajas y desventajas. Entre las ventajas de utilizar piedra caliza (CaCO_3) incluyen bajo coste, facilidad de uso y formación de lodos densos de fácil manejo. Entre las desventajas incluyen tiempos de reacción más lentos y bajos rendimientos. En esta reacción de neutralización, los iones de hidrógeno se consumen generando iones bicarbonato, y los metales disueltos precipitan como sulfatos, carbonatos e hidróxidos. La cal hidratada (Ca(OH)_2) es fácil y segura de usar, eficaz y relativamente barata. Las principales desventajas son las grandes cantidades de lodo que se producen y altos costos asociados a las instalaciones requeridas. En este proceso, el ácido se neutraliza, los metales se precipitan en forma de hidróxidos de metal, y se forma yeso, si hay suficiente sulfato en solución. El Ca(OH)_2 presenta una buena eficiencia para precipitación de metales como el cadmio, cobre, hierro, plomo, níquel y zinc presentes en solución. No obstante, la solubilidad de los metales varía en función del pH, por lo que no todos los metales se

pueden precipitar en el mismo pH. Una combinación de agentes de neutralización ($\text{CaCO}_3 + \text{Ca(OH)}_2$) y otros aditivos químicos pueden ser necesarios para lograr una buena remoción de estos metales. La soda cáustica (NaOH) es especialmente eficaz para el tratamiento de aguas con un alto contenido de manganeso. El manganeso es difícil de eliminar de las aguas de mina porque el pH debe elevarse por encima de 9 para que precipite. La soda cáustica eleva el pH por encima de 10. Entre las principales desventajas del NaOH es su alto costo, los riesgos en la manipulación y las malas propiedades que presentan los lodos generados (Lottermoser, 2010).

La precipitación de sulfuros con Na_2S , NaHS o CaS es un proceso eficaz para el tratamiento de las aguas residuales que contienen metales pesados. Las características atractivas de este proceso es la alta eficiencia en la eliminación del metal para un amplio rango de pH, la eficacia en la precipitación de ciertos metales, incluso a muy bajos niveles de pH, y la rápida velocidad de reacción. Desafortunadamente, la precipitación de sulfuros tiene una tendencia a formar H_2S (gas tóxico) a valores de pH bajos (Feng y col., 2000).

Durante el proceso de neutralización, estos reactivos son normalmente dosificados como una suspensión a un tanque o serie de tanques agitados mecánicamente. Una mezcla activa es esencial con el fin de evitar que se produzca el blindaje de las partículas de los reactivos con los precipitados generados, inhibiendo las reacciones de neutralización y aumentando el consumo de reactivos.

Los precipitados formados, que inicialmente están en suspensión, presentan distintos tamaños de partículas y algunos de ellos pueden decantar muy lentamente debido a su pequeño tamaño. Lo más común en una mina es que luego de la neutralización se descargue esta suspensión (precipitados + agua neutralizada) en un estanque de decantación o directamente al dique de colas del mineral, en algunos casos se utilizan equipos de decantación previos para eliminar la fracción más gruesa. Este proceso de sedimentación se puede acelerar mediante el uso de floculantes y coagulantes. Tales reactivos (sales inorgánicas de Fe y Al o polímeros orgánicos) conducen a la formación de agregados sólidos más grandes, que como resultado precipitan con mayor velocidad y en forma más eficiente, obteniendo se soluciones más cristalinas (Lottermoser, 2010).

En el caso particular de la minería del uranio, para disminuir la concentración de los radionucleídos disueltos, como el Radio, puede que se requiera de procesos de precipitación extras. La eliminación de radio se lleva a cabo por precipitación con cloruro de bario. El cloruro de bario se introduce en el circuito de agua, y el radio se coprecipita con el sulfato de bario formado. Estos precipitados requieren un proceso de sedimentación y filtración, y finalmente estas sales son dispuestas en estanques artificiales construidos para tal fin. Estos precipitados radiactivos, no pueden ser dispuestos en otras balsas, ya que las sales precipitadas podrían volver a disolverse (Lottermoser, 2010).

Más allá de las ventajas y desventajas para cada reactivo, podemos destacar dos o tres puntos negativos de esta técnica. El primero y más importante, es la pérdida de grandes cantidades de ácido en la neutralización, cantidad que podría ser recuperada y reutilizada (Kesieme y col., 2014). Como se mencionó en el párrafo anterior, la separación y decantación de los precipitados es difícil, debido a la formación de flóculos esponjosos. Con espesadores y filtros convencionales, el proceso es lento y caro. Además, el uso de balsas de decantación fomenta la pérdida de agua por evaporación, lo que debería reducirse al mínimo, además de requerir de espacios excesivos (Feng y col., 2000). Finalmente, para el caso particular de la minería del uranio, la formación de bicarbonato por efectos de la neutralización, fomenta la lixiviación del uranio remanente en las colas de mineral en los casos en que estas aguas neutralizadas son descargadas junto a las colas. Por este motivo se puede observar en el tiempo

un aumento en la concentración de uranio en solución como carbonato de uranilo (Lottermoser, 2010).

Como resultado final con esta técnica se logra la eliminación de la mayor parte de los metales pesados, pero las corrientes obtenidas pueden quedar con una alta salinidad. Estas corrientes deben reducirse a niveles aceptables, por lo que en muchos casos, es necesario otro proceso adicional para alcanzar los niveles deseados de salinidad. Las tecnologías existentes para este fin pueden ser la evaporación, la ósmosis inversa o las resinas de intercambio iónico (Feng y col., 2000).

Filtración por Membranas

Debido a su relativa simplicidad y versatilidad, la filtración por membrana es hoy en día uno de los procesos de purificación de agua más utilizados. Diferentes membranas han sido diseñadas para cubrir la totalidad de tamaño de partículas, desde macromoléculas hasta iones monovalentes, así como también se han evaluado diferentes materiales capaces de trabajar en distintas condiciones del proceso. El principio de funcionamiento principal es el clásico proceso de tamizado, donde las partículas con tamaños mayores al tamaño del poro de la membrana son rechazadas, al ser atravesada esta membrana por una corriente de agua, mientras que las partículas más pequeñas pasan a través con el agua. Los procesos de filtración por membranas se pueden dividir en cuatro según el tamaño de partícula que pueden retener y la presión de operación asociada (Figura 2.3) (Hintukainen, 2015):

- **Microfiltración (MF):** Tienen un tamaño de poro nominal entre 0,1 - 10 μm y son utilizadas para remover partículas coloidales así como también bacterias.
- **Ultrafiltración (UF):** El tamaño de partícula que es capaz de retener va de 10 - 100 nm. Son utilizadas para eliminar moléculas grandes, virus, bacterias pequeñas y partículas coloidales ultrafinas de soluciones. También son utilizadas para la clasificación de proteínas.
- **Nanofiltración (NF):** Tiene la capacidad de retener partículas de tamaño entre 1 - 10 nm. Este proceso sólo rechaza iones multivalentes tales como Ca^{2+} y Mg^{2+} , mientras que deja los iones monovalentes más pequeños pasar a través de la membrana sin contribuir a la presión osmótica que dificulta la filtración. Esto permite que la nanofiltración pueda ser aplicada a una variedad de nuevos procesos de purificación de agua tales como el ablandamiento del agua, la eliminación de color, así como reducción de la demanda química y biológica de oxígeno.
- **Osmosis Inversa (RO):** Es un proceso de membrana capaz de eliminar compuestos incluso más pequeños que 1 nm disueltos en soluciones. El principio de funcionamiento de las membranas de ósmosis inversa no es el mismo que el de las membranas de filtración. Estas membranas no tienen poros propiamente dichos, sino que están formadas a partir de estructuras de polímeros en forma de capas que forman una membrana semipermeable. Cuando dos líquidos están separados por una membrana semipermeable, la diferencia de presión osmótica mueve el disolvente (agua) de la solución más diluida a la solución más concentrada hasta que las concentraciones de ambos lados de la membrana alcancen el equilibrio. En el proceso de osmosis inversa, gracias a la aplicación de una presión hidrostática superior a la diferencia de presión osmótica, sobre el lado más concentrado de la membrana, se logra invertir el sentido del flujo de agua desde la solución concentrada a la solución diluida. De esta

manera, los procesos con membranas de ósmosis inversa pueden eliminar casi todos los compuestos disueltos, incluyendo iones monovalentes, y permitir que sólo pase el agua. Los procesos RO puede alcanzar entre 98 – 99,8 % de rechazo para NaCl. Debido a su alta capacidad de separación y a la alta pureza del producto obtenido, la RO es utilizada tanto en el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales, así como la desalinización de agua de mar. Sin embargo, entre sus inconvenientes se encuentra el problema de las posibles incrustaciones de sales sobresaturadas y el ensuciamiento de la membrana, debido al aumento de la presión en el lado mas concentrado, lo que reduce la recuperación del agua.

Como gran parte de los contaminantes peligrosos para el medio ambiente en las aguas residuales de minería consiste en metales disueltos y sales, RO o NF son las técnicas que se requieren para la eliminación de estos compuestos. Sin embargo, la utilización de UF o MF como una etapa de pretratamiento puede disminuir considerablemente el ensuciamiento en las etapas de tratamiento posteriores mediante la eliminación de partículas sólidas coloidales y/o posibles contaminantes orgánicos que no se pueden separar de manera efectiva por decantación.

Los materiales de membrana se dividen generalmente en membranas poliméricas (de compuestos orgánicos) y membranas cerámicas (de compuestos inorgánicos). La mayoría de los procesos con membrana se basan en membranas poliméricas, pero el interés por las membranas cerámicas se ha incrementado rápidamente en los últimos años debido a la alta resistencia a la descomposición química y térmica, lo que significa que pueden funcionar a temperaturas más altas, mayores presiones y en condiciones químicas más extremas (Hintukainen, 2015).

Adsorbentes y Resinas de Intercambio Iónico

El uso de una matriz sólida para la adsorción y/o intercambio iónico de especies en solución es otra alternativa de tratamiento. En estos procesos se hace pasar la corriente a tratar a través

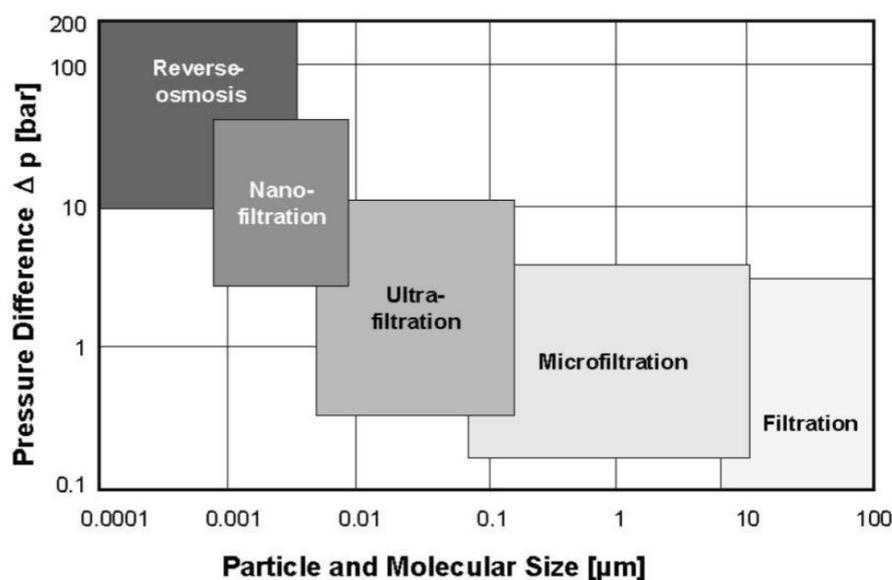


Figura 2.3. Tecnologías de membranas (Hintukainen, 2015).

de un lecho (matriz sólida) donde se produce la retención de los compuestos que se desean eliminar de las aguas residuales. El volumen del lecho requerido aumenta proporcionalmente con la carga del compuesto a eliminar, de modo que a concentraciones más altas, el tamaño de los equipos hace que estos procesos sean económicamente inviables. Las aplicaciones de estos tipos son generalmente limitadas a niveles de concentración del orden de ppm (mg/l) (Kentish y col., 2001). El proceso es semi-continuo, ya que después de un cierto tiempo de operación, el lecho se satura y requiere de un reacondicionamiento para poder volver a ser reutilizado. En este proceso de reacondicionamiento, en una primera etapa, la mayoría de los compuestos retenidos son eliminados del lecho por una solución de elución, y finalmente el lecho es regenerado a las condiciones iniciales por procesos específicos para tal fin. Con lo cual, esta solución de elución concentrada en compuestos no deseados debe ser tratada de forma adecuada.

El carbón activado es el adsorbente más utilizado en este tipo de procesos, generalmente para eliminar impurezas orgánicas en las aguas, gracias a su superficie no polar y a un bajo coste. Al no ser selectivo, una gran variedad de especies orgánicas pueden ser retenidas, incluso algunas inorgánicas. Otros adsorbentes han sido estudiados y aplicados, como las arcillas de bentonita, gracias a su mayor selectividad, pero con un coste mayor (Kentish y col., 2001).

Las resinas de intercambio iónico (IX), en cambio, son polímeros sintéticos con capacidad de intercambiar iones disponibles en su superficie. Existen resinas catiónicas, capaces de retener cationes, y resinas aniónicas, capaces de retener aniones. Estas resinas en forma individual o combinadas han sido muy utilizadas en aplicaciones a escala industrial para ablandamiento o desmineralización de agua. Estos procesos presentan una gran eficacia en la retención de iones, ya sea cationes o aniones, logrando niveles de pureza del agua muy altos. Su selectividad es variable dependiendo del tipo de resina utilizada, y del estado de los iones en solución. Se han estudiado, desarrollado y aplicado resinas con gran selectividad hacia cationes de metales pesados presentes en aguas residuales, así como también para radionucleidos disueltos en agua (Kentish y col., 2001).

En las corrientes residuales de las minas, las principales sales disueltas son sulfato de calcio y de magnesio. Para reducir el contenido en estas sales se puede utilizar dos lechos de resinas en serie, uno catiónico y otro aniónico. Las resinas catiónicas son capaces de retener calcio y magnesio, y las resinas aniónicas son capaces de retener los sulfatos. Posteriormente el calcio y el magnesio puede ser eluido de la resina catiónica con ácido sulfúrico y el sulfato con cal de la resina aniónicas. Estas corrientes resultantes, mas concentradas, pueden ser mezcladas entre ellas para finalmente precipitar y disponer de las sales de sulfato de calcio y magnesio (Feng y col., 2000). Lechos en serie de resinas catiónicas y aniónicas también han sido estudiadas para la retención de sílice (Pérez-González y col., 2012).

Los procesos de tratamiento con resinas de intercambio iónico pueden ser aplicados como una etapa de tratamiento secundario para eliminar selectiva de componentes específicos, tales como metales pesados, amoníaco, radionucleidos o sulfato de calcio. En la práctica, se limita el proceso a aguas residuales con valores de TDS menores a 350 mg/l, para evitar problemas de operación y costos de tratamiento muy elevados. Los costos de capital y de operación pueden llegar a aumentar entre un 20-40 % cuando se agrega un tratamiento por resinas al circuito de tratamiento por neutralización y precipitación con cal. Las resinas de intercambio iónico son rentables cuando se requiere alcanzar niveles muy bajos de sulfatos en solución (Department of Water Affairs and Forestry, 2007a).

En general, el intercambio iónico no es económicamente viable para el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales concentradas debido al alto costo de los agentes

de regeneración y la necesidad de tratamiento de una salmuera de elución concentrada. La vida útil de la resina se ve afectada por su degradación física y por el envenenamiento (ensuciamiento irreversible) por incrustaciones, compuestos orgánicos o algunos metales como el cobalto (Department of Water Affairs and Forestry, 2007a).

Cristalización-Evaporación

El objetivo y principal interés por esta tecnología es alcanzar la descarga de líquido cero (ZLD), debido a que lo que se consigue con este proceso es separar y recuperar los sólidos disueltos y el disolvente de la solución, el agua. Esto se puede lograr por evaporación del agua hasta que la solución concentrada alcanza la sobresaturación y los componentes disueltos comienzan a cristalizar. El tipo más importante y ampliamente utilizado en la industria es el cristizador- evaporador con recirculación, también conocido como cristizador de circulación-magma (Hintukainen, 2015).

Las ventajas de la cristalización por evaporación sobre los procesos de filtración de membrana tradicionales es su capacidad teórica para reducir el volumen de las aguas residuales salinas concentradas a cero, así como la posibilidad de recuperar los residuos sólidos como sales puras o mezclas. El agua evaporada, es luego recuperada por condensación de dicho vapor. El proceso puede ser utilizado para tratar las aguas hipersalinas obtenidas de los procesos RO o NF. El principal inconveniente de esta tecnología es su gran consumo de energía que hace que no sea rentable en muchos casos (Hintukainen, 2015).

Este tipo de procesos con evaporación térmica pueden ser rentables si en la instalación hay disponibilidad de calor residual o de una fuente de combustible barato. El consumo de energía varía con el diseño, la velocidad de flujo de aguas residuales y la concentración de sales disueltas (Department of Water Affairs and Forestry, 2007a).

Diques de Evaporación

La evaporación por efecto de la radiación solar podría ser considerado como un método de cristalización por evaporación menos intensivo. Es decir, se logra la reducción del volumen de la salmuera a través de la evaporación del agua gracias al aporte de calor mediante la energía solar. La técnica consiste en canalizar las aguas residuales a estanques artificiales impermeables de poca profundidad para lograr la evaporación del agua, después de lo cual la sal restante se puede recolectar o dejarla como disposición final en el estanque (Hintukainen, 2015).

La evaporación solar es una tecnología de tratamiento rentable, ya que los únicos costos relacionados son la construcción de los estanques y el bombeo del agua. Por lo que es ampliamente utilizada en la industria minera, en especial, en la minería del uranio debido a los problemas relacionados con la descarga de agua al ambiente en este tipo de instalación. Pero por si sola, no sería la técnica seleccionada si lo que se busca es la recuperación y reutilización del agua, ya que en esta técnica el agua se pierde por evaporación.

Debido a que requiere una gran cantidad de radiación solar, es utilizada en zonas áridas interiores. En zonas húmedas, especial control se debe tener con respecto a las lluvias, debido a que puede tener un efecto negativo en el total de agua evaporada, además de generar desborde de los estanques. Además, se podría sumar el riesgo de fugas que podrían alcanzar fuente de agua subterráneas o superficiales y generar problemas de contaminación, y la utilización de grande espacios del terreno (Hintukainen, 2015).

2.3.2. Problemas de las técnicas de tratamiento de aguas convencionales en minería

Todas las técnicas de tratamientos presentan sus ventajas y desventajas, pero podemos identificar cuatro puntos negativos entre las diferentes técnicas:

- **Pérdida de agua:** Como ya se mencionó en el apartado anterior, en los diques o estanques de evaporación el agua se pierde en la evaporación sin la posibilidad de ser reutilizada, lo que genera un aumento en el consumo global de agua de la instalación. Además, en estos estanques con áreas tan extensas, pueden existir pérdidas por infiltraciones del agua hacia el terreno. Algunas de las técnicas de filtración por membranas presentan buenos porcentajes de recuperación de agua, pero no obstante siempre se obtiene una salmuera por donde se pierde un porcentaje del agua (10-20%). Finalmente, se podría decir que en forma teórica con la neutralización y precipitación se podría recuperar toda el agua, pero como ya se mencionó anteriormente, la decantación y liberación del agua de los precipitados formados, aún con el uso de floculantes y coagulantes, es un proceso difícil y con tiempos de decantación prolongados. Por lo que en forma práctica un porcentaje de esta agua se pierde con los precipitados que finalmente son dispuestos en diques de evaporación.
- **Consumo energético:** De los tratamientos evaluados, el que presenta el consumo de energía más intensivo es, lógicamente, el de cristalización por evaporación del agua. Este consumo puede ser reducido haciendo un buen balance energético para aprovechar calor residual de la condensación del vapor generado y/o calor residual de otra operación de la instalación. Los procesos con membranas también presentan un consumo energético, principalmente asociado al requerimiento de bombas para impulsión del agua a través de las membranas. Este consumo es relativamente importante para los procesos de RO y NF, donde los requerimientos de presión son más elevados. El tratamiento con resinas de intercambio también tiene consumo energético asociado a la impulsión de la solución a través del lecho. Como la pérdida de carga aumenta con el tamaño del lecho, el consumo de electricidad para mover las bombas puede ser significativo para lechos grandes. Si bien la neutralización y precipitación, en teoría, no debía tener un consumo de energía apreciable, el proceso involucra a más de un equipo mecánico para lograr los rendimientos adecuados. Entre ellos podemos mencionar a tanques agitados para mantener los sólidos en suspensión, dosificadores, decantadores dinámicos y bombas.
- **Eficacia de los procesos:** Normalmente, no se alcanza la calidad de agua requerida solo con un proceso de tratamiento, y es necesario más de uno de estos procesos en serie. La neutralización y precipitación es muy utilizada para la eliminación de metales pesados y ácidos, pero el nivel de sales disueltas tienden a aumentar, porque lo que es necesario es una filtración por membranas o un proceso de resinas de intercambio iónico que reduzca esta salinidad. Así mismo, las salmueras obtenidas en los procesos de RO pueden requerir un proceso de cristalización por evaporación para recuperar la mayor cantidad de agua, y los procesos IX finalmente requieren de un proceso de precipitación y/o evaporación para las soluciones de elución obtenidas.
- **Problemas de operación:** Asociados principalmente a los procesos con membranas, donde problemas de ensuciamiento e incrustaciones sobre las membranas hacen disminuir considerablemente el rendimiento del proceso, aumentando las presiones de trabajo. Por lo que es normal en las operaciones de RO, tener aguas arriba un proceso de MF o UF que retenga a los componentes más grandes, lo que mejora considerablemente los problemas de ensuciamiento. En los procesos con resinas también tienen lugar

este tipo de problemas, lo que disminuye considerablemente el rendimiento, porque lo que generalmente el proceso se limita a soluciones previamente tratadas. También puede ocurrir lo que se conoce como envenenamiento de la resina, que es la pérdida de capacidad de carga debido a elementos que no se eluyen en sucesivas operaciones de carga y regeneración, y se van acumulando y ocupando sitios activos de la resina. Esto obviamente disminuye el rendimiento de la operación. Problemas de incrustaciones pueden presentarse también en el tratamiento por cristalización por evaporación, debido a las temperaturas y presiones de trabajo que favorecen estos fenómenos.

2.3.3. Tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales

Una serie de nuevas tecnologías se han ido desarrollando desde hace unos años para evitar o disminuir uno o varios de los principales problemas mencionados en el apartado anterior. Las tecnologías que se presentan a continuación, son las que más se acercan al objetivo general del trabajo de recuperar y reutilizar las aguas residuales en instalaciones mineras.

Destilación por Membrana

La Destilación por Membrana (MD) es una tecnología basada en la evaporación para el tratamiento de solución altamente concentrada. En este proceso una membrana microporosa hidrófoba es utilizada para separar las fases de líquido y vapor, dicha membrana permite que los compuestos volátiles difundan a través de ella. En este tipo de procesos la membrana actúa únicamente como una barrera de separación física y no tiene mayor efecto en la selectividad del compuesto volátil a separar. La fuerza impulsora del sistema es la diferencia de presión de vapor a través de la membrana. El lado de alimentación siempre es la solución que se desea tratar calentada a la temperatura de operación en contacto directo con la membrana (Hintukainen, 2015).

Entre las ventajas de la Destilación por Membrana por sobre la destilación convencional podemos destacar las temperaturas de operación inferiores (60-80°C) y una mayor interfase líquido-vapor dada por la membrana. La baja temperatura de operación permite una mayor eficiencia energética y una disminución de los costos de operación. Una interfase líquido-vapor grande permite la construcción de equipos de proceso más compactos, que no solo ocupan menos espacio, sino que los costos iniciales de construcción son menores, lo que redundaría en menores costos iniciales de construcción. La MD también es capaz de recuperar grandes volúmenes de agua, con buena calidad, que puede ser reutilizada en el proceso (Pérez-González y col., 2012).

El desafío más importante de la Destilación por Membrana para el tratamiento de aguas residuales de alta salinidad, al igual que otros procesos de membrana, es la posibilidad de generar incrustamiento de sales poco solubles. Esto puede causar el bloqueo de los poros por donde pasa el flujo de permeado. La hidrofobicidad de la membrana es otro punto importante, es una propiedad intrínseca de la membrana debido a la cual solo pasa a través de ella vapor de agua, concentrando a las sales en la solución de alimentación (Hintukainen, 2015).

Electrodiálisis

La electrodiálisis (ED) es una tecnología de membrana capaz de eliminar especies cargadas a partir de una solución, por lo que es factible de aplicar a aguas residuales con sales disueltas.

El proceso se basa en la atracción eléctrica de iones en solución hacia polos cargados y en la utilización de membranas selectivas de iones. Una serie alternada de membranas de intercambio aniónico (AEM) y membranas de intercambio catiónico (CEM) se colocan entre el ánodo y el cátodo. Las corrientes de alimentación se inyectan en cada uno de los canales formados entre las membranas. Los aniones, tales como Cl^- son atraídos hacia el ánodo a través de las AEM, mientras que cationes, tales como Na^+ son atraídos hacia el cátodo a través de la CEM. Como las CEM no dejan pasar los aniones, estos se van concentrando en dirección al ánodo quedando atrapados en los canales. Lo opuesto ocurre para los cationes en dirección al cátodo, por lo que finalmente la corriente de alimentación en canales intermedios se va diluyendo. En la Figura 2.4 se presenta el esquema de funcionamiento de la técnica de ED (Hintukainen, 2015).

La electrodiálisis reversible (EDR) es el modo de operación mas utilizado de esta técnica en la industria. Básicamente consiste en invertir periódicamente la polaridad del ánodo y del cátodo, así como también los canales de los flujos de alimentación y concentrado. De este modo, se evita en gran medida el ensuciamiento y las incrustaciones que podrían ocurrir sobre la membrana, pudiendo aumentar la concentración de las soluciones salinas a tratar (<20%). Los procesos de ED utilizan cerca del 30% de la energía que se utiliza en una evaporación térmica (Pérez-González y col., 2012).

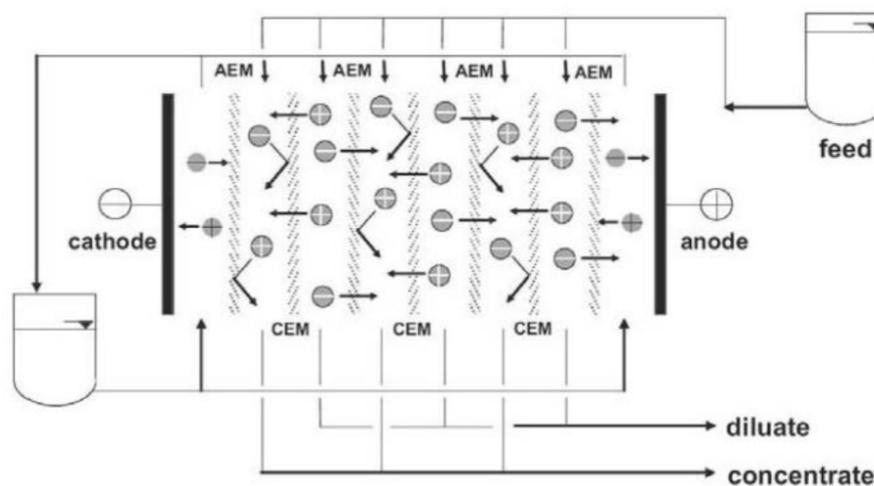


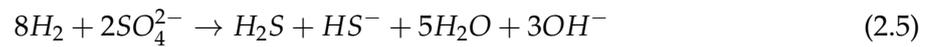
Figura 2.4. Principio de funcionamiento de la electrodiálisis (Hintukainen, 2015).

Cristalización por congelamiento eutéctico

La cristalización por congelamiento eutéctico (EFC) es una tecnología alternativa a la cristalización por evaporación. La idea de cristalizar los sólidos disueltos por la congelación del propio disolvente no es nueva. Sin embargo, la creciente demanda en la eficiencia de los procesos y la búsqueda de alternativas de descarga de líquidos cero (ZLD) han puesto gran interés en el desarrollo de esta tecnología. La tecnología EFC se basa en que opera a una temperatura específica (punto eutéctico) para producir sales de alta pureza y disolvente cristalizado puro de sistemas binarios disolvente-sal. Entre las ventajas de esta técnica podemos mencionar: no requiere de agregados de productos químicos, el proceso de congelación teóricamente requiere menos energía que el proceso de evaporación, buena calidad de los productos obtenidos (cristales de sal y hielo), y bajo potencial de corrosión debido a las bajas temperaturas de operación (Hintukainen, 2015).

Tratamiento Biológicos

Se han desarrollado técnicas de tratamiento de las aguas residuales en las cuales se han usado bacterias sulfato reductoras (SRB) como reemplazo de la cal o hidróxidos con el mismo fin de precipitar los metales pesados. El principio de funcionamiento de los bioreactores SRB se basa en la capacidad de este tipo de bacterias de reducir los sulfatos disueltos a sulfuro de hidrógeno gaseoso, el cual luego reacciona con los iones de los metales pesados produciendo precipitados de sulfuro del metal que se quiere eliminar (Ecuación 2.5 y Ecuación 2.6).



Entre las principales ventajas de este método podemos mencionar: mejor calidad del efluente (menor concentración del metal), mejores propiedades de sedimentación de los lodos obtenidos, y la capacidad para recuperar metales con valor económico. Las principales desventajas que presentan los tratamientos biológicos son: el problema de cultivar a nivel industrial la cepa de bacterias específica que se requiere, y la vulnerabilidad del proceso a cambios en las condiciones de operación. La precipitación de los metales generalmente se lleva a cabo en el mismo reactor que la reducción biológica, lo que disminuye la eficiencia del proceso al producirse pérdida de biomasa con los precipitados formados. Es posible evitar este problema, si en lugar de usar reactores tipo tanque agitado se utiliza sistemas con biomasa inmovilizada, como reactores con biofilm o con lechos empacados. Este tipo procesos con biomasa inmovilizada es mas lento que los procesos con biomasa suspendida, debido principalmente a tener una superficie de contacto biomasa-liquido más pequeña (Hintukainen, 2015).

3. CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se aplican gran parte de los conceptos desarrollados teóricamente en el capítulo anterior a un proyecto de desarrollo de un emprendimiento minero de extracción y producción de concentrados de uranio. El desarrollo del proyecto titulado *Complejo Minero Fabril Cerro Solo* lo está llevando adelante la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) de Argentina (CNEA, 2005), organismo autárquico de investigación, desarrollo y aplicaciones de la energía nuclear para usos pacíficos. Este caso fue seleccionado para el TFM para continuar con mi participación en el desarrollo del proyecto en el cual he estado trabajando desde el año 2009 al 2015. He participado en dos sectores del proyecto, en un principio en el desarrollo experimental de los procesos de obtención de concentrados de uranio a partir del mineral del yacimiento Cerro Solo y durante el último período más relacionado con la ingeniería de procesos preliminar para una posible planta de producción de concentrados de uranio.

Como se mencionó al comienzo del trabajo, el objetivo es evaluar la importancia que tiene la recuperación y recirculación de agua en una instalación minera, debido a que específicamente para este proyecto, por su ubicación geográfica, el consumo de agua es uno de los puntos clave para la viabilidad técnica, ambiental y económica del proyecto. En este capítulo se presentan una breve descripción del proyecto y de la instalación minera en base a su ingeniería preliminar, se evalúan los resultados de un estudio hidrogeológico realizados por terceros para determinar la disponibilidad de agua en la zona, se confecciona y evalúa el balance de agua de la instalación, y finalmente, se plantean posibles cambios que hagan al proyecto más sustentable desde el punto de vista de la gestión del agua.

Cabe hacer una aclaración de antemano, debido a la confidencialidad de esta información es posible que algunos datos no se presenten en el texto del trabajo o que la información parezca incompleta, cualquier aclaración se podrá llevar a cabo en la presentación oral.

3.1. PROYECTO: COMPLEJO MINERO FABRIL CERRO SOLO

La CNEA ha sido desde el inicio del desarrollo de la energía nuclear en Argentina un jugador importante. Ha participado en la instalación y operación de las Centrales Nucleares de Potencia (CNP) que actualmente operan en Argentina, así como también en el desarrollo y fabricación de los elementos combustibles a base de uranio natural necesarios para la generación de energía eléctrica en estas CNPs. Actualmente la CNEA participa en cooperación con empresas estatales en la fabricación de los elementos combustibles para las tres CNPs en operación que posee Argentina y en la producción de dióxido de uranio (UO_2) de calidad nuclear es componente principal de los combustibles nucleares. Este UO_2 de calidad nuclear se obtiene a partir del concentrado de uranio producido en las minas. Desde hace un par de décadas la extracción y la producción de concentrados de uranio a partir de minerales ha cesado en Argentina, debido principalmente a la baja del precio internacional de este *commodity*, llevando al cierre y desmantelamiento de instalaciones mineras de extracción de uranio, por lo que actualmente todo el concentrado de uranio que demandan las centrales nucleares es importado. En 2006, se pone en marcha un plan nacional para reactivar la actividad nuclear en Argentina, donde la minería del uranio se postula como uno de los puntos a reactivar. Con este contexto favorable, la CNEA encaró un programa integral y multidisciplinario de

estudios de diferentes yacimientos nacionales, con el fin de obtener estudios de factibilidad técnico-económicos de estos yacimientos. Dentro de este marco se lleva adelante el desarrollo del proyecto de un emprendimiento minero en el yacimiento Cerro Solo (López, 2015).

El proyecto tiene como objetivo la producción de concentrados de uranio para cubrir una parte de la demandada interna de Argentina. La cual se estima que para el año 2020 alcance las 300 toneladas anuales (OECD NEA, 2014), por lo que en estas etapas preliminares se busca alcanzar entre el 40-60 % de esta demanda (120 a 180 tn/año) (López, 2015).

En cuanto a las características principales del yacimiento se puede decir, gracias a los trabajos exploratorios que ha realizado la CNEA desde el año 1990 en la zona, que los niveles mineralizados se distribuyen en areniscas y conglomerados cretácicos del Grupo Chubut a una profundidad de entre 50-130 metros y distribuidos en un área de 180km². El uranio se presenta en su forma mineralizada principalmente como Uraninita, Coffinita y asociado a materia orgánica, en una concentración variable entre 0,3-0,8 %. Se ha detectado la presencia de molibdeno en los cuerpos mineralizados de uranio en cantidades variables que hacen posible la obtención de concentrados de molibdeno como subproducto (CNEA, 2005). Las reservas inferidas a diciembre de 2012, en base a los resultados obtenidos de más de 70000 metros de perforaciones, superan las 6.400 toneladas de uranio (OECD NEA, 2014), convirtiendolo en el yacimiento con mayores reservas de Argetina. Esta muy buena relación tenor-espesor para un depósito tipo arenisca, una mineralización con buenas condiciones para su tratamiento y beneficio, el suave relieve y la accesibilidad a la zona, y el clima de la región, que permite trabajar prácticamente todo el año, ponen a este yacimiento entre los primeros de la lista con condiciones favorables para su explotación.

Si bien no se ha dado fin a los trabajos exploratorios, a lo largo de todos estos años de trabajo se ha obtenido suficiente volumen de muestras de los cuerpos mineralizados como para poder realizar, no solo estudios geológicos o mineros, sino también para poder realizar estudio de prefactibilidad técnica para la extracción del uranio y del molibdeno en forma experimental, lo que la CNEA ha estado realizando con gran énfasis desde el año 2008. Finalmente en 2015, en base a estos resultados experimentales sumados a estudios técnicos de metodologías de explotación del yacimiento, se confeccionó el primer estudio de prefactibilidad técnica-económica para la explotación del yacimiento, planteando en el mismo la ingeniería preliminar del Complejo Minero Fabril Cerro Solo (CMFCS) (López, 2015).

3.1.1. Localización del yacimiento y Clima de la región

El yacimiento está ubicado en la zona sur de Argentina, en la Provincia del Chubut (Figura 3.1), en el Distrito Pichiñan Este sobre la vertiente oriental de la Sierra de Pichiñán, correspondiente a la comarca geológica conocida como "Chubut Extrandino". Las coordenadas geográficas sitúan al yacimientos en: Lat 43° 23' S y Long 68° 47' W, a una altura cercana a los 630 msnm (López, 2015). Durante la mayor parte del año se puede acceder al yacimiento con vehículos de tracción simple, con excepción de los períodos de alta precipitación de lluvia o nieve, en los cuales se requiere de vehículos de doble tracción. La localidad mas cercana se llama Paso de Indios y se encuentra a unos 60km por caminos de ripio. La ciudad de Trelew, la ciudad mas cercana, se encuentra aproximadamente a 400km y la Ciudad de Buenos Aires a unos 1700km en carretera.

El marco climático es de características áridas, con un promedio anual de lluvias para casi 70 años de registro de 145 mm/año, que frente a la alta solicitud atmosférica de humedad genera un déficit hídrico de casi 600 mm/año. La temperatura media anual es de 12,8°C, con

valores de 21°C para meses estivales (Enero) y de 4,5°C en invierno (Julio). Por tratarse de un clima continental, se registran en la región temperaturas muy altas en el Verano y muy bajas en el Invierno, como así también una gran amplitud térmica entre el día y la noche. También se registran ocurrencias frecuentes de heladas y algunas nevadas entre Junio y Agosto. La influencia del anticiclón del Pacífico origina esta sombra orográfica que tipifica a la Patagonia Extrandina, culpable de las escasas lluvias en la estación invernal, de mínima sustracción de humedad (Laboratorio de Hidrología, 2012).

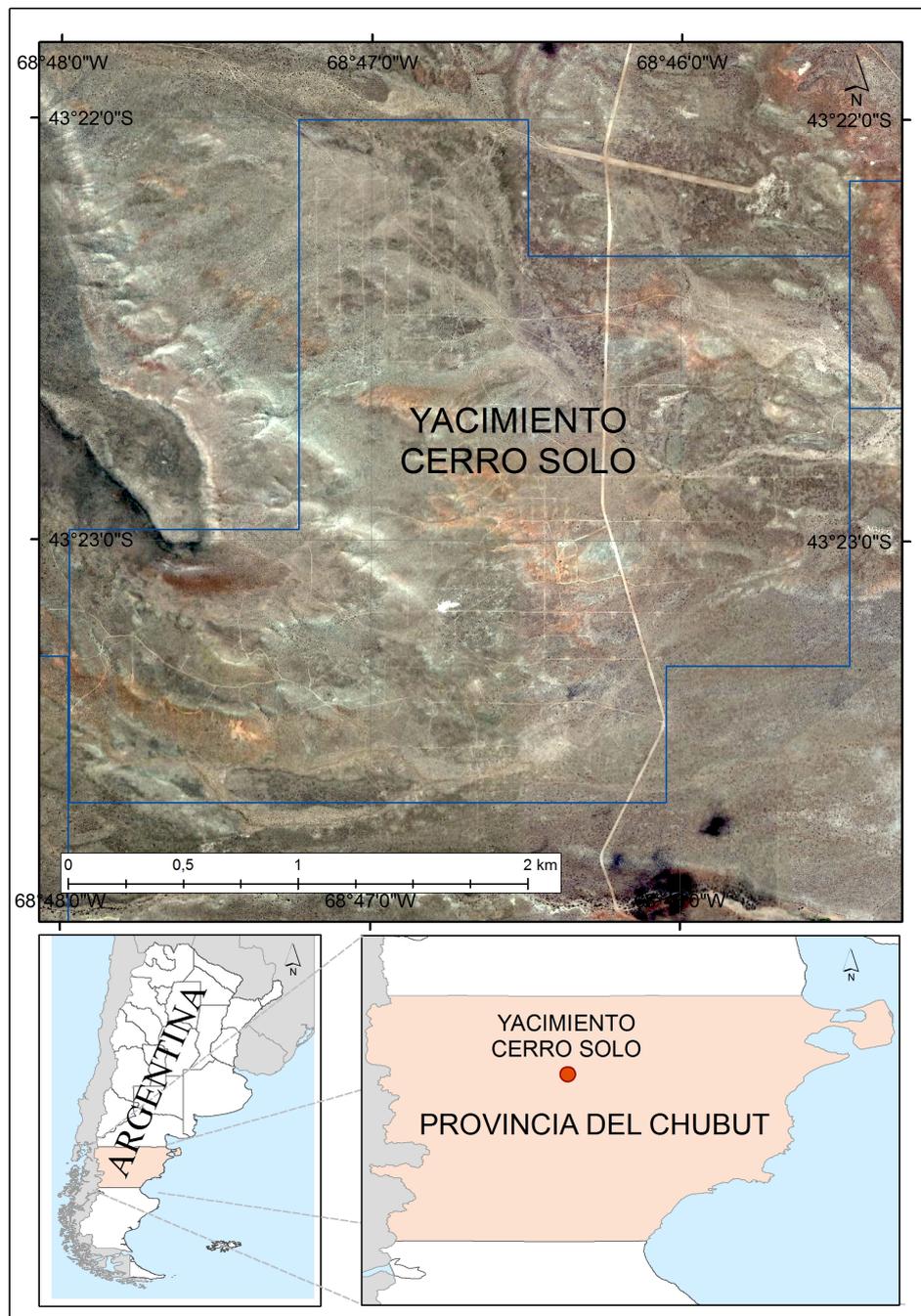


Figura 3.1. Ubicación del Yacimiento Cerro Solo. Fuente: Propia

3.1.2. Descripción de la planta de procesamiento

En este apartado se describen las principales etapas del proceso de tratamiento del mineral que han sido evaluadas en el estudio de prefactibilidad realizado por la CNEA. Como base de estimación en dicho estudio se postuló que la instalación debería tener la capacidad para procesar veintiséis toneladas horas de mineral (26 t/h). En la Figura 3.2 se presenta el diagrama de flujo del proceso donde se discriminan las etapas principales (López, 2015).

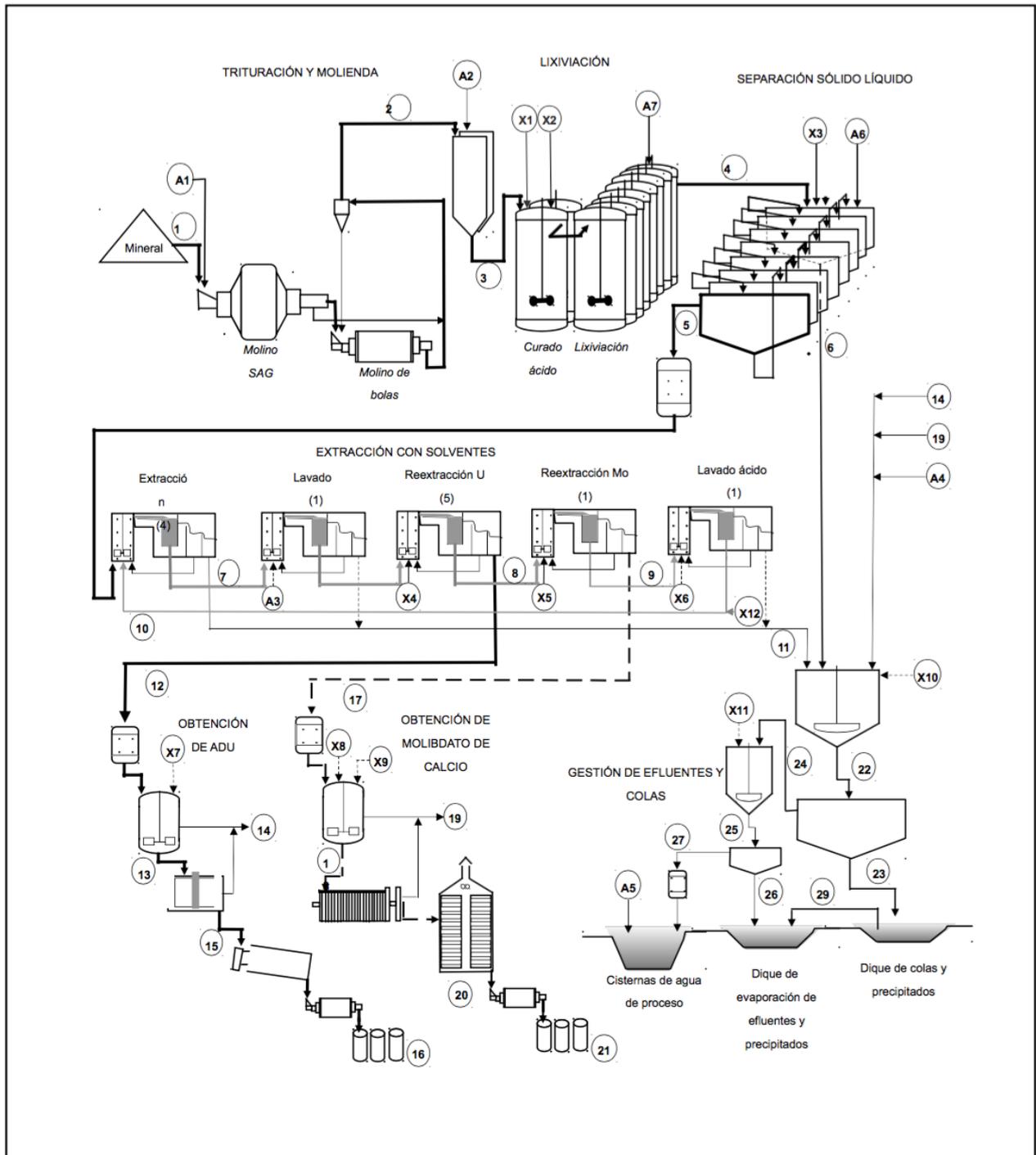


Figura 3.2. Diagrama de flujo de proceso del CMFCS (López, 2015)

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de estas etapas (López, 2015; Merritt, 1971; IAEA, 1993):

- **Extracción del Mineral:** La forma de explotación del yacimiento aun no ha sido determinada, se están estudiando tanto la técnica de explotación subterránea como la de canteras a cielo abierto (*open pit*), en ambos casos una posterior etapa de control geológico será necesaria, para garantizando la cantidad y homogeneidad en la ley media del mineral para cumplir con los requisitos para poder ingresar a la planta de procesamiento del mineral y concentración del uranio. El mineral pretriturado in-situ se transporta en camiones desde la zona de extracción hasta la zona de clasificación donde se estima su potencial uranífero en un túnel radimétrico y se clasifica la carga. Luego, el contenido del camión se vuelca en la pila correspondiente a su clasificación. El área será provista de un sistema de mitigación de polvo basado en aspersores con agua. Posteriormente el mineral se transporta de las pilas a la planta a través de una pala cargadora que vuelca el mineral en una tolva preclasificadora, donde el mineral pasante se descarga en una cinta transportadora que lo lleva hasta la etapa de molienda. En la Figura 3.2 la corriente [1] representa el ingreso de este mineral a la planta de procesamiento.
- **Molienda:** El sistema de molienda será con aporte de agua [A1] y estará compuesto por dos etapas: el mineral primero entra a un molino tipo SAG mill (molino semi autógeno) y luego pasa a un circuito cerrado conformado por un molino de bolas para alcanzar el grado de molienda requerido y 2 zarandas vibratorias. Una zaranda removerá del circuito las partículas finas generadas y la otra tamizará la suspensión de mineral molido respecto del grado de molienda buscado, el circuito se cierra con un sistema de separación ciclónica. Finalmente los minerales molidos húmedos [2] son enviados a tanques de almacenamiento donde mediante agitación mecánica y agregado de agua [A2] se alcanza la suspensión de sólidos deseada (50 % m/m). Finalmente esta pulpa pasa a la etapa de lixiviación [3].
- **Lixiviación:** La lixiviación ácida se lleva adelante en varios tanques agitados en serie que le dan el tiempo de residencia requerido para alcanzar una extracción de uranio superior al 80 %. En los primeros tanques, se lleva a cabo lo que se conoce como «curado ácido», que consiste en agregar a la pulpa en agitación la solución lixivante ácida [X1], en este caso ácido sulfúrico (H_2SO_4), y el agente oxidante (MnO_2) [X2] en forma brusca, para luego pasar al resto de los tanques donde se calienta la suspensión por el agregado de vapor vivo [A7]. Finalmente esta suspensión de mineral en el lixiviado [4] pasa a una etapa de separación sólido-líquido.
- **Separación Sólido-Líquido:** Esta etapa consta de siete decantadores (espesadores) en contracorriente (DDC), más uno final para la eliminación de los finos y un sistema de filtros para el pulido final de la fase líquida (Lixiviado). En este proceso se separa la solución acuosa que contiene el uranio y el molibdeno (lixiviado) [5] de la suspensión de minerales agostado, también llamada *colas de mineral* [6]. La utilización de los DDC en el proceso mejora la eficiencia del proceso mediante los sucesivos lavados que se le realiza a la pulpa de mineral, logrando de este modo separar al lixiviado retenido en el sólido, así como también reduciendo la acidez de las colas. No obstante se requiere el agregado de grandes volúmenes de agua y se diluye la solución lixivante de 1 a 4 veces. Finalmente este lixiviado conteniendo uranio y molibdeno es filtrado y continua hacia la etapa de extracción por solventes. Por otro lado, la pulpa espesada (colas de mineral), que normalmente alcanza una concentración de sólidos de 62,5 % m/m es enviada a la etapa de gestión de efluentes y colas.

- **Extracción por Solventes:** En esta etapa se logra separar y concentrar al uranio y al molibdeno de las demás impurezas que puedan haber sido disueltas en la etapa de lixiviación. El proceso en sí cuenta con 5 etapas consecutivas de extracción y decantación líquido-líquido:
 1. *Extracción:* Esta es la etapa más importante y de mayor volumen, en esta se pone en contacto el solvente de extracción [10] (aminas terciarias en solución orgánica de kerosene) con el lixiviado [5]. Mediante esta extracción líquido-líquido, el uranio y el molibdeno pasan selectivamente de la fase acuosa a la fase orgánica, dejando a todas las demás impurezas en la fase acuosa, llamada comúnmente *refinado*. Este refinado es direccionado a la etapa de gestión de efluentes y colas [11], y la fase orgánica cargada con uranio y molibdeno [7], llamada normalmente *solvente cargado* pasa a la siguiente etapa.
 2. *Lavado del solvente:* Esta es una nueva etapa de contacto líquido-líquido, la cual tiene la finalidad de eliminar las impurezas en el solvente cargado que puedan haber sido extraídas en la etapa anterior, mediante un lavado con una solución acuosa [A3]. Dicha solución realiza el pulido del solvente, llevándose las impurezas, y finalmente es direccionada a la etapa de gestión de efluentes y colas [11]. El solvente cargado pasa a la siguiente etapa.
 3. *Reextracción de uranio:* En esta etapa se pone en contacto el solvente cargado con una solución acuosa de cloruro de sodio (NaCl) [X4] que selectivamente libera solamente al uranio dejando al molibdeno en el solvente, logrando de esta forma la separación de ambos elementos. Esta solución acuosa concentrada y purificada conteniendo el uranio [12] continúa hacia la etapa de obtención de ADU, y el solvente cargado con molibdeno pasa a la siguiente etapa de reextracción.
 4. *Reextracción de Molibdeno:* En este contacto el molibdeno es separado del solvente al ponerlo en contacto con una solución acuosa de carbonato de sodio (Na₂CO₃) [X5], de esta forma el molibdeno vuelve a quedar disuelto en una solución acuosa [17] y es enviado a la etapa posterior de obtención de molibdato de calcio.
 5. *Lavado ácido:* Finalmente, el solvente descargado requiere de una etapa más de contacto líquido-líquido de lavado o regeneración, en la cual se reacondiciona el solvente para ser recirculado a la etapa de Extracción, mediante un contacto con una solución acuosa ácida [X6]. La solución acuosa que abandona este proceso se envía a la etapa de gestión de efluentes y colas [11] y el solvente orgánico se recircula a la primera etapa del proceso de extracción por solventes, de ser necesario se adiciona más solventes [X12] por pérdidas por evaporación o arrastre durante los sucesivos contactos.

Cada una de estas etapas trabaja a diferentes relaciones de fase acuosa a fase orgánica (R=A/O), por lo que al final del proceso las corrientes de salida de las soluciones acuosas de uranio y molibdeno concentradas y purificadas tienen un factor de concentración de entre 30 y 40 en relación al lixiviado que ingresa al proceso.

- **Obtención de ADU:** La corriente de reextracción de uranio que sale del proceso de extracción con solventes, es derivada por bombeo a un tanque agitado. Allí se hace burbujear amoníaco gaseoso [X7] para precipitar al uranio en la forma de diuranato de amonio (ADU o "yellow cake"). Este precipitado húmedo luego se hace pasar por una centrifuga para eliminar el agua libre, y finalmente por un horno rotatorio para alcanzar la humedad final requerida para el producto. La torta obtenida es molida al tamaño requerido y el polvo de ADU es dispuesto en recipientes herméticos para su venta y

distribución. Las aguas madres de la precipitación y la corriente líquida que abandonan la centrífuga [14] son enviadas a la etapa de gestión de efluentes y colas.

- **Obtención de Molibdato de Calcio:** La solución acuosa de reextracción de molibdeno se deriva a un tanque agitado en el que se le agrega ácido sulfúrico [X8] hasta llevar el pH a valores cercanos a pH=2, eliminando de este modo los carbonatos como dióxido de carbono. Luego, se agrega cal hidratada (hidróxido de calcio) [X9] para precipitar el molibdeno como molibdato de calcio (CaMoO_4), obteniendo un precipitado con contenido de molibdeno cercano al 40%. Este precipitado húmedo se filtra en un filtro prensa y se seca en un horno a bandejas. Al igual que en el caso del uranio, la torta obtenida es molida y el polvo dispuesto en recipientes para su venta y distribución. Las aguas madres de la precipitación, al igual que los líquidos obtenidos en el filtro prensa [19] son enviados a la etapa de gestión de efluentes y colas.
- **Gestión de efluentes y colas:** Considerando la metodología de lixiviación dinámica continua, existe la posibilidad de gestionar las colas del mineral y los efluentes a través de un proceso continuo. Para ello se colectan, en un tanque de neutralización (TN) con agitación a baja velocidad, las diversas corrientes de efluentes de proceso. Simultáneamente se va dosificando con cal [X10] mientras se controla el pH, que deberá rondar valores de entre pH=7-8. Si bien existen algunas corrientes discontinuas como las de las etapas de recuperación de uranio y molibdeno, éstas son considerablemente más pequeñas comparadas con demás. En este grupo de corrientes pequeñas, también se pueden incluir a las aguas residuales de limpieza de instalaciones y de efluentes cloacales [A4]. No obstante las corrientes [6] y [11] si son continuas de volúmenes importantes y con sólidos en suspensión. Una vez neutralizados, los efluentes [22] se envían a un espesador para volver a separar los sólidos de los líquidos. La pulpa [23], conformada principalmente por colas de mineral y precipitados de neutralización, se deposita en un dique o estanque de colas y precipitados (DC) construidos con membranas sintéticas impermeables y todas las especificaciones técnicas para evitar las infiltraciones de los líquido en el terreno y mitigarlas en caso de que estas ocurran. La corriente líquida [24] que abandona el espesador será permanentemente analizada y, en caso necesario, tratada para precipitar otros contaminantes o reducir concentraciones de algunos elementos que pudieran interferir en el proceso de lixiviación. La corriente [X11] sería el reactivo necesario para realizar esa precipitación dependiendo de lo que se requiera eliminar. Esta última condición se considera valiosa para la reutilización parcial como agua de proceso. Por lo que luego de esta etapa de precipitación nuevamente se requerirá un separador líquido-sólido, donde el precipitado formado [26] es enviado a un nuevo dique de evaporación de efluentes y precipitados (DE), construidos con todos los niveles de seguridad necesarios para el caso. Los líquido separados [27] son filtrados, analizados, y en caso de cumplir con las exigencias de calidad, recirculados a la cisterna de agua de procesos. Estos embalses o diques están concebidos para funciones diferentes, el DC tiene la función de almacenar las colas de mineral agotado dándole un tiempo de residencia prolongado para que los sedimentos muy finos decanten y el agua se recupere o se evapore en él. Por lo que estos no tiene un área muy grande, y tienden a ser mas profundos, para el caso puntual de este se estima la construcción de varios DC durante la vida útil del proyecto para evitar grandes embalses muy costosos y con mas riesgo ambiental. En cambio, los DE son diseñados en función de las condiciones climáticas del sitio, para contar con un volumen de evaporación constante del agua como forma de retorno del agua al ambiente. Estos últimos generalmente tienen áreas muy extensas y poca profundidad, para favorecer la evaporación. Como se puede observar

en la Figura 3.2, existe una corriente [29] la cual representa el trasvase de agua que se ha separado de las colas del DC al DE, así como también se menciona en la ingeniería preliminar una corriente [28] (no representada gráficamente) para trasvasar el agua de DE a la cisterna de agua de procesos, siempre y cuando los análisis de calidad de estas aguas lo permitieran.

- **Cisterna de agua de proceso:** Generalmente son un grupo de 4 cámaras de almacenamiento de agua con una capacidad tal que permita la operación segura de la planta. Estas cámaras tienen la finalidad de distribuir el agua por toda la planta, es decir desde ellas se bombea el agua que es utilizadas en los distintos procesos [A1, A2, A3, A4, A6, A7]. El agua que alimenta a estas cisternas proviene de dos fuentes: el sistema de bombeo de agua de pozo [A5] y la porción de agua recuperada en la etapa de gestión de efluentes [27].

3.2. BALANCE DE AGUA PARA EL CMFCS

El objetivo de realizar el Balance de Agua (BA) en esta fase de desarrollo del proyecto es el de estimar el consumo total de agua de la instalación, es decir, cual será la cantidad de agua que se deberá extraer del ambiente para el correcto funcionamiento de la planta. Esto involucra no solo determinar los requerimientos de agua de las etapas que conforman el proceso de tratamiento del mineral, sino también conocer la disponibilidad y calidad de agua en la zona, para poder caracterizar el suministro de agua a la instalación.

3.2.1. Suministro de agua

Un punto importante a la hora de hacer una estimación del BA de la instalación para un proyecto minero en desarrollo es conocer, con un grado de certeza importante, cuales serán las fuentes de agua disponibles en la zona, con que caudal se podrá extraer de la fuente sin generar alteraciones importantes en el medio, y con que calidad se podrá obtener este volumen de agua. En concordancia con ello, la CNEA solicitó en el pasado un estudio hidrogeológico del yacimiento y zonas aledañas para obtener datos confiables de la capacidad de extracción de agua del ambiente, la calidad de esta agua y el balance hídrico de la zona. Este estudio fue realizado por el Laboratorio de hidrología de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) de Argentina en cooperación con personal de la CNEA, durante un período de casi 24 meses (2011-2012) de relevamiento y procesado de la información. El estudio titulado: *Estudio Hidrogeológico del Distrito Uranífero Pichiñán Este - Provincia de Chubut* tiene como objetivo principal obtener una evaluación de la disponibilidad de agua subterránea con la suficiente base científica, tal que permita estimar las reservas sustentables, su renovabilidad y el régimen de extracción más adecuado para la preservación del recurso (Laboratorio de Hidrología, 2012). En este apartado se presentan los principales resultados de este informe que permitan caracterizar el suministro de agua de la futura instalación.

Para llegar a los resultados plasmados en dicho informe, el equipo de trabajo ha tenido que desarrollar tareas de campo dentro de las cuales se pueden mencionar como las más importantes a la construcción de seis pozos de bombeo y sus posteriores ensayos que sirvieron para determinar las características hidrodinámicas del principal acuífero del medio geológico estudiado, la implementación de una red de estaciones meteorológicas que permitirá a la CNEA contar con información detallada y en línea de las principales variables atmosféricas de la región bajo estudio, la realización de cuatro campañas de recolección de muestras y

análisis químicos de aguas subterráneas y superficiales, y la georeferenciación de todos los puntos singulares del estudio, los sitios de muestreo y las principales vías de comunicación. El trabajo se completó posteriormente con el procesamiento de toda esta información, sumado la histórica disponible, mediante análisis estadísticos y cartográficos procesando finalmente toda la información generada mediante simulaciones matemáticas de modelos geológicos con el fin de obtener los resultados buscados (Laboratorio de Hidrología, 2012).

Fuentes de Suministro de Agua

Las aguas subterráneas son el único recurso hídrico disponible en la zona, excepto el aledaño río Chubut con aguas dulces bicarbonatadas cálcicas, que se encuentra a más de 30km de distancia. Las escorrentías superficiales son escasas y periódicas, tal como se espera en un clima árido de estas características, por lo que el estudio se centro principalmente en la caracterización y funcionamiento de la disponibilidad de agua subterránea. No obstante ello se identificaron y evaluaron las escorrentías superficiales existentes para comprender el funcionamiento de la cuenca.

A partir de todos los estudios y relevamientos geológicos e hidrogeológicos de superficie y del subsuelo se pudo obtener el carácter hidrológico de la zona, es decir, la capacidad de los materiales geológicos para recibir, alojar y transmitir el agua subterránea. De esta manera, son reconocidas unidades acuíferas, acuicludas, acuitardas y acuífugas. Las primeras están dadas por aquellas rocas o sedimentos capaces de recibir, alojar y transmitir el agua con facilidad, caso de las gravas, arenas y limos medianos-gruesos. Los acuicludos son los materiales que pueden recibir y alojar el agua, pero no la transmiten (típicamente las arcillas). Acuitardos son aquellos que reciben, alojan agua y la transmiten con dificultad bajo ciertas condiciones (diferencias de cargas hidráulicas, tiempo), como los limos arcillosos y arcillas limosas, y acuífugos las rocas que si bien reciben agua, no la alojan ni transmiten. Para el caso de los acuíferos, es necesario diferenciar entre los que ocurren en medio poroso (porosidad primaria o intergranular) con una dinámica geohidrológica darcyana, y los desarrollados en rocas fisuradas o kársticas (porosidad secundaria o de fisuras), bajo régimen turbulento. En base al comportamiento hidrológico del subsuelo se pudieron identificar en la zona en estudio los siguientes sistemas geohidrológicos:

- **Acuífero freático (superior):** Son en general arenas, limos y limos arenosos de mediana permeabilidad y con zonas no saturadas adosada de poco desarrollo, a lo sumo una decena de metros. Su piso está constituido por materiales generalmente acuicludos.
- **Acuícludo >>acuitardo:** Son fracciones pelíticas que poseen las características de un acuicludo, identificándose a profundidades mayores (70m) tobas acuicludas que cumplen el rol confinante del acuífero confinado. Sin embargo se identifico en algunas zonas (24m) la presencia de areniscas pelíticas con características acuitardas.
- **Acuífero confinado:** Tiene la particularidad de poseer doble porosidad: la primaria en los conglomerados (especialmente la matriz gravosa), arenas gruesas y arenas medianas, y la secundaria por diaclasamiento, con incipientes espacios de disolución. Su espesor es importante, entre 20 m y más de 150 m.
- **Acuífugo:** Es la base del acuífero confinado, representa una capa impermeable desde el punto de vista práctico, con litología variable, pero predominando las rocas vulcanitas, que aunque estas puedan presentar fisuras, según los ensayos de bombeo realizados, estas parecen estar ocluidas.

Podemos identificar de esta clasificación la presencia de dos fuentes de suministro posibles: el acuífero freático y el acuífero confinado. Sin embargo, los estudios realizados han descartado al acuífero freático como posible fuente de suministro debido principalmente a que presenta discontinuidad espacial, ofrece muy reducidos espesores saturados como para intentar su explotación en escala industrial, y presenta una vulnerabilidad de moderada alta, por lo que dentro de las recomendaciones del informe queda reflejado que el acuífero freático no puede ser afectado para ningún uso dentro del proyecto por no brindar de modo alguno los caudales requeridos, además de poseer interés ecológico y ser accesible a los pobladores. En cambio, estos estudios si dan como resultado la posibilidad de utilizar el **acuífero confinado** como fuente de suministro para una posible explotación minera, con zonas saturadas aptas para ser explotadas y una vulnerabilidad casi nula, salvo en los puntos de baja profundidad (10m).

Capacidad de Extracción de Agua

Una vez identificada la fuente de suministro del recurso agua, los ensayos de bombeo, así como los estudio de modelización dinámicos y estáticos, se han completado el resto de los estudios para identificar el tamaño, capacidad, caudal de extracción sustentable y propuestas de caudales de extracción real para el proyecto, con estimaciones a 20 años de operación.

En la Tabla 3.1 se presentan los valores obtenidos para las reservas de agua en el acuífero confinado en toda su extensión (220km²) y acotado solamente a la zona afectada al yacimiento. Las reservas del acuífero confinado, desde el punto de vista de reservas estáticas, pueden clasificarse en tres tipos (Laboratorio de Hidrología, 2012):

- **Reservas Bajo Confinamiento (RBC):** Son las que mantienen tal condición respondiendo al producto del área a cuantificar, el coeficiente de almacenamiento y la altura del nivel piezométrico sobre el techo del acuífero.
- **Reservas Geológicas (RG):** También denominadas profundas, responden al producto del área por la porosidad efectiva y por el espesor saturado del acuífero.
- **Reservas Totales (RT):** Que se conforman por la suma de las dos anteriores (RBC + RG).

Las reservas que pueden ser utilizardas teóricamente como mínimo de manera sustentable son las RBC, afectadas por la compresibilidad del agua y la del esqueleto o armazón sólida (clastos y poros intercomunicados), las que podrían reponerse fácilmente en función del tiempo, ya que constituyen una expresión directa de la recarga. Sin embargo y ante requerimientos originados por factores sociales, económicos, políticos, legales o ecológicos, es posible utilizar una parte de las RG, generalmente del orden del 5 % al 10 %, conformando este total las Reservas de Explotación (REX) que si se las considera para un tiempo dado, se asemejan a un Caudal de Seguridad Sustentable (CSS), o al menos constituyen su límite superior para la extracción. Para el caso en estudio, se han adicionado el 1 % de las RG.

Tabla 3.1. Reservas subterráneas de agua. Fuente: (Laboratorio de Hidrología, 2012)

Zona	Área 1x10 ⁶ m ²	RBC 1x10 ⁶ m ³	RG 1x10 ⁶ m ³	RT 1x10 ⁶ m ³	REX 1x10 ⁶ m ³
Acuífero confinado	220,000	0,275	525,800	526,075	5,533
Zona yacimientos	24,000	0,033	101,000	101,033	1,043

El caudal de explotación sustentable (o caudal de seguridad sustentable) es a aquel que puede extraerse sin introducir en el sistema acuífero efectos no deseados, se lo calcula en

función de las REX y los resultados de la relación afluencia/efluencia subterránea en el área del modelo utilizado. Para nuestro caso, sería del orden de $15.159 \text{ m}^3/\text{día}$ para la totalidad del área del acuífero confinado, y de $2.857,5 \text{ m}^3/\text{día}$ para los sectores afectados al yacimiento. Como puede advertirse, el peso relativo del volumen correspondiente a las RBC dentro de este caudal es muy bajo.

Es evidente que no debería considerarse para una propuesta de aprovechamiento del agua subterránea en el Distrito Pichiñán Este, la totalidad del área donde se halla el acuífero confinado. Si así fuese, se estaría incurriendo en una sobre estimación del caudal de seguridad sustentable, al suponer que podría afluir agua de toda la superficie de 220 km^2 . Sobre la base del interés minero, de la posible localización de las obras de infraestructura (planta de tratamiento mineral, dique de colas, etc.) y de la mayor densidad de información básica con que fue realizado el estudio, se ha considerado que los sectores lindantes al yacimiento Cerro Solo son los indicados para establecer allí la zona de extracción de agua. Por lo que se toma el valor de $2.857,5 \text{ m}^3/\text{día}$ como caudal de extracción sustentable.

Finalmente, como resultado del estudio se proponen **dos perforaciones** correctamente diseñadas desde el punto de vista hidrogeológico, capaces de erogar $15 \text{ m}^3/\text{h}$ cada una, alcanzando una dotación segura de $720 \text{ m}^3/\text{día}$, con un factor de seguridad de 4 sobre respecto al caudal de explotación sustentable adoptado. Según simulaciones dinámicas, en base a los resultados obtenidos en los ensayos de bombeo, para un régimen de 24hs de extracción de un pozo a caudal de $360 \text{ m}^3/\text{día}$ ($15 \text{ m}^3/\text{h}$), en un radio de 500 metros y un tiempo de operación de 7.300 días (20 años), la depresión en el nivel del acuífero a esa distancia sería en 20 años de 0,86 metros. Así mismo, a este ritmo de extracción de agua se estaría en condiciones seguras como para alcanzar un nuevo equilibrio dinámico del sistema hídrico subterráneo aún en condiciones muy adversas como la de suponer una recarga nula a largo plazo (20 años) (Laboratorio de Hidrología, 2012).

Calidad del Agua Extraída

Es de destacar en forma genérica la regularidad que caracteriza a las aguas subterráneas en su composición y propiedades físicas (fundamentalmente temperatura) a través del tiempo, condición diferencial respecto a las aguas superficiales, maximizada en un sistema bajo condiciones naturales como es el del Distrito Pichiñán Este, es decir, sin perturbaciones de flujo por explotación (Laboratorio de Hidrología, 2012).

Debido a la extensión del acuífero confinado su concentración en sales varía en un amplio rango, con EC desde valores próximos a $1.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ hasta extremos de $19.000 \mu\text{S}/\text{cm}$, variando en relación directa con el sentido general de circulación del agua dentro del acuífero, lo que hace pensar que el agua a medida que atraviesa las distintas formaciones geológicas va disolviendo distintas sales y variando su composición química.

En el informe hidrogeológico no se especifica una calidad del agua en el punto de extracción, en principio porque esta posición aún no está del todo definida. Pero lo que es posible observar es que la composición va a depender en forma significativa del lugar donde se decida hacer la extracción. Si bien aún no está definido el lugar exacto, siguiendo el mismo criterio que para la determinación de los caudales máximos de extracción, en el cual la extracción se realizaría en las inmediaciones del Yacimiento Cerro Solo (YCS), se evaluará la calidad del agua en esta zona del acuífero confinado, como para tener una primera aproximación a la calidad que el agua poseerá al momento de la extracción.

Así mismo, en las inmediaciones del yacimiento la calidad del agua subterránea también

es muy variable, en la Tabla 3.2 se presentan los principales parámetros analizados. En la Figura 3.3 se presenta el gráficos de Piper-Hill para una series de muestras, donde se puede observar que predomina la presencia de facies sulfatada sódica y sódico-cálcica sobre la bicarbonatada-sulfatada sódica y sódica-cálcica. Se destaca la presencia de elementos minoritarios y trazas de Fe, Mn, Al, Zn y elementos menos frecuentemente Mo, Pb, Ni, Co, Cu y Li.

Tabla 3.2. Características de las aguas subterráneas en el YCS. Fuente: (Laboratorio de Hidrología, 2012)

pH		6,8 – 7,9
EC	μS/cm	900 – 7.100
Dureza	CaCO ₃ /l	100 – 2600

En todo el sistema hay presencia de F, As, U y ²²⁶Ra, los dos primeros con mayor relevancia en el acuífero freático y los últimos en el confinado, debido a la presencia de los cuerpos mineralizados. El contenido de uranio varía entre 6,40 y 85 μg/l y el ²²⁶Ra entre 0,30 y 7,90 pCi/l.

Como última observación, se puede acotar que el agua del acuífero confinado no es apta para el consumo humano, debido a que en la mayoría de los casos, supera algunos de los umbrales de tolerancia especificados en el Código Alimentario Argentino. Los umbrales superados que más se repiten en las muestras son TSD, sulfato, dureza, amonio y metales. Por lo que estas aguas pueden clasificarse como agua con calidad industrial (Laboratorio de Hidrología, 2012).

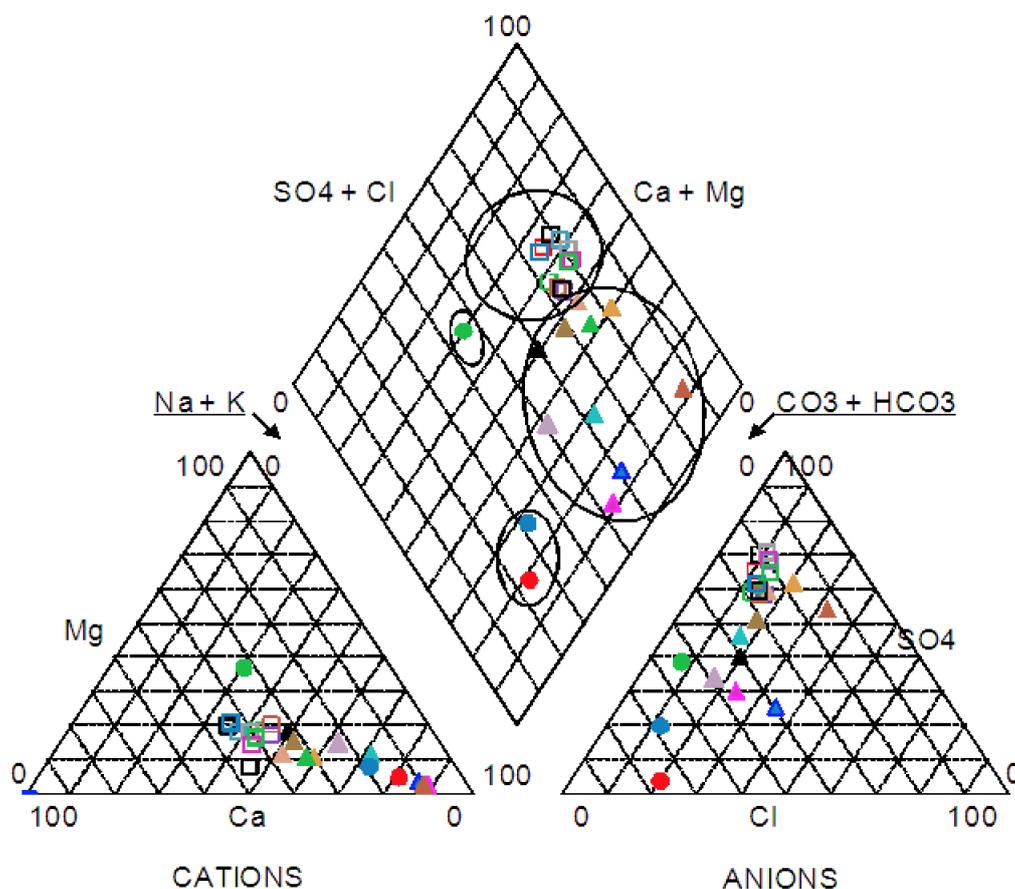


Figura 3.3. Diagrama de Piper-Hill de muestras de YCS. Fuente: (Laboratorio de Hidrología, 2012)

3.2.2. Pérdidas por Evaporación

Como se mencionó en capítulos anteriores, la pérdida de agua por evaporación en tanques abiertos a la atmósfera o en diques de colas del mineral puede representar un porcentaje importante del consumo de agua total de la planta. No obstante, el proceso de evaporación natural en regiones con balance hídrico negativo (déficit hídrico), es utilizado como forma de devolver el agua al ambiente y cerrar el ciclo del agua dentro de una instalación minera. Es muy común, en emprendimientos mineros que tratan minerales de uranio que existan estos embalses o diques de evaporación, diseñados con el fin de disponer de las aguas con concentración de sustancias que presente un riesgo a la población y/o al ambiente, como por ejemplo los radionucléidos (^{226}Ra) que están presentes en las aguas residuales de la minería del uranio.

Para poder diseñar estos diques o hacer estimaciones sobre las pérdidas de agua por evaporación, es imprescindible conocer el Balance Hídrico (BH) de la zona en estudio, definido como la diferencia entre la evapotranspiración potencial (ETP) y las precipitaciones (PP) en un período de tiempo determinado (Ecuación 3.1). Este estudio también fue incluido en el marco del Informe Hidrológico (Laboratorio de Hidrología, 2012), obteniendo como resultado un Déficit Hídrico (DH) de **589 mm/año** utilizando el Método de Thornthwaite-Mather para un período de más de 70 años (1941-2011), con una corrección de los valores de ETP calculados por el método de acuerdo a las horas de insolación diaria (función de la latitud del lugar) y número real de días del mes. En la Figura 3.4 se puede observar la gran variación anual que presenta este parámetro.

$$DH = ETP - PP \quad (3.1)$$

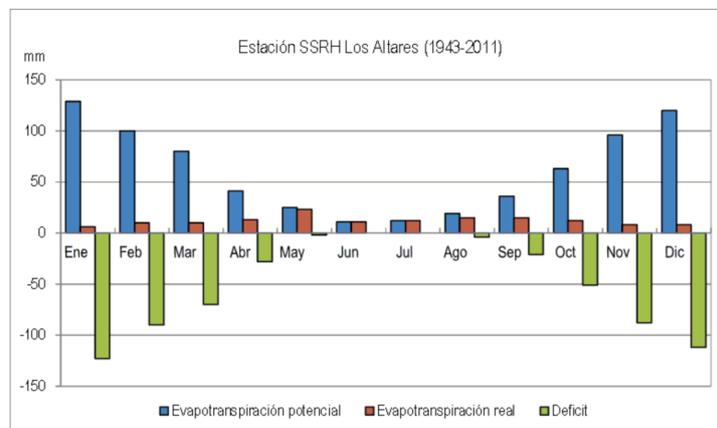


Figura 3.4. Variación anual del Déficit Hídrico (DH). Fuente: (Laboratorio de Hidrología, 2012)

3.2.3. Balance de Agua

Para resolver el balance de agua (BA) de la instalación, lo primero que hay que hacer es identificar en el diagrama de flujo del proceso (PFD) (Figura 3.2), sumado a datos extras que puedan estar en la memoria descriptiva del proceso, cada uno de los procesos y de las corrientes en las que el agua está presente en cualquiera de sus fases, y especificar su origen y destino.

Con las corrientes identificadas, podemos confeccionar un diagrama de bloques para tener una idea más visual de los procesos y corrientes involucradas, así como también identificar

aquellos procesos o corrientes que puedan estar por fuera del PFD, ya sea porque se las considera menos importantes o porque no son una corriente tangible en si misma, como son los volúmenes de agua que se pierden por evaporación. En la Figura 3.5 se presenta el diagrama de bloques del balance de agua para el Complejo Minero Fabril Cerro Solo realizado en función de la memoria descriptiva de la ingeniería preliminar del CMFCS (López, 2015), donde se pueden identificar las principales corrientes de agua de la instalación. La nomenclatura de las corrientes en el diagrama de bloques fue modificada para tener la información mas ordenada. En la Tabla 3.3 se presentan ambas nomenclaturas para poder identificarlas en ambos diagramas. Observando detenidamente el diagrama de bloques para el balance de agua (DBBA) (Figura 3.5), podemos observar nuevos procesos (bloques) o corrientes. Por un lado podemos identificar los bloques de *Sistema de Bombeo, Preparación de Soluciones, Planta Desmineralizadora o Caldera* como procesos que no estaban identificados directamente en el PFD, pero que se presentaban en forma indirecta o se detallaban en la memoria descriptiva de la ingeniería preliminar. Podemos también observar el desglose de la etapa de Gestión de Efluentes y Colas en: *Neutralización de Efluentes y Colas, Precipitación de Impurezas, Diques de Colas y Diques de Evaporación*, y la presencia de un bloque de *Perdidas por Evaporación*, que buscan estimar la pérdida total de agua por evaporación. También podemos mencionar corrientes que no aparecen en el PFD como las [CAP-5/6/7] que también tienen que salir del Cisterna de Agua de Procesos, o como la [C-2] que se detalla en la memoria descriptiva y completa el balance en la Caldera, enviando el condensado [VSA-1] a la etapa de Neutralización de Efluentes y

Tabla 3.3. Corrientes del Balance de Agua para CMFCS. Fuente: (Propia)

Corrientes Id	Id PFD	Origen	Destino
AS-1		Acuífero subterráneo	Cisterna de agua de proceso
C-1	A-7	Caldera	Lixiviación
C-2		Caldera	Vapor otros usos
CAP-1	A-1	Cisterna de agua de proceso	Trituración y Molienda
CAP-2	A-2	Cisterna de agua de proceso	Tanque de Pulpa
CAP-3	A-6	Cisterna de agua de proceso	Separación Sol-Liq
CAP-4	A-3	Cisterna de agua de proceso	Extracción por Solventes
CAP-5		Cisterna de agua de proceso	Preparación de Soluciones
CAP-6		Cisterna de agua de proceso	Planta Desmineralizadora
CAP-7		Cisterna de agua de proceso	Lavado de inst. y efl. cloacales
DC-0		Dique de colas	Pérdida por Evaporación
DC-1	29	Dique de colas	Dique de evaporación
DE-0		Dique de evaporación	Pérdida por Evaporación
DE-1	28	Dique de evaporación	Cisterna de agua de proceso
EX-1	11	Extracción por Solventes	Neutralización de Efluentes y Colas
EX-2	12	Extracción por Solventes	Obtención de ADU
EX-3	17	Extracción por Solventes	Obtención de Molibdato de Calcio
LIEC-1	A-4	Lavado de inst. y efl. cloacales	Neutralización de Efluentes y Colas
LIX-1	4	Lixiviación	Separación Sol-Liq
NEC-1	23	Neutralización de Efluentes y Colas	Dique de colas
NEC-2	24	Neutralización de Efluentes y Colas	Precipitación de impurezas
ADU-1	14	Obtención de ADU	Neutralización de Efluentes y Colas
MO-1	19	Obtención de Molibdato de Calcio	Neutralización de Efluentes y Colas
PD-1		Planta Desmineralizadora	Caldera
PI-1	26	Precipitación de impurezas	Dique de evaporación
PI-2	27	Precipitación de impurezas	Cisterna de agua de proceso
PS-1	X-4	Preparación de Soluciones	Extracción por Solventes
PS-2	X-5	Preparación de Soluciones	Extracción por Solventes
PS-3	X-6	Preparación de Soluciones	Extracción por Solventes
SSL-1	5	Separación Sol-Liq	Extracción por Solventes
SSL-2	6	Separación Sol-Liq	Neutralización de Efluentes y Colas
SB-1	A-5	Sistema de Bombeo	Cisterna de agua de proceso
TP-1	3	Tanque de Pulpa	Lixiviación
TM-1	2	Trituración y Molienda	Tanque de Pulpa

Colas. Es interesante observar las corrientes [DC-0] y [DE-0], que representan las pérdidas por evaporación del agua en la superficie de los embalses, y que cuya suma representa la pérdida total de agua por evaporación [PE-0], y a la vez, la única forma en la cual el sistema devuelve el agua al ambiente para que esta pueda seguir su ciclo. Hay que destacar que la corriente [AS-1] representa la capacidad máxima de extracción de agua, definida en el apartado anterior, por lo que [SB-1] debe ser igual o menor a este valor una vez resuelto el balance. Finalmente, como la

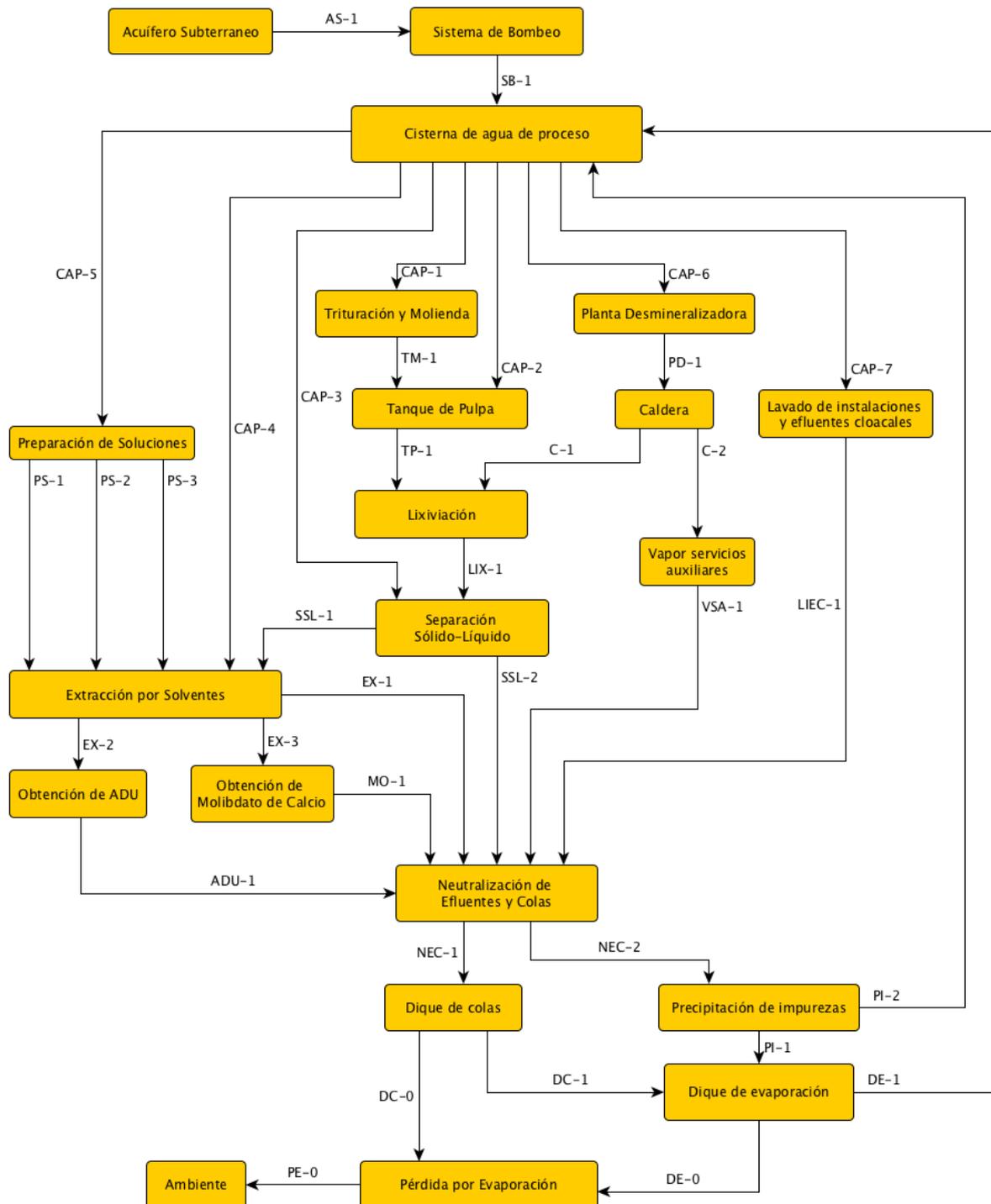


Figura 3.5. Diagrama de Bloques para el Balance de Agua del CMFCS. Fuente: (Propia)

única salida de agua del sistema es por evaporación [PE-0], esta corriente tiene que ser igual al consumo de agua neto de la instalación [SB-1] para que el balance de agua cierre.

El paso siguiente, es evaluar la información que disponemos sobre el caudal y composición de cada una de estas corrientes. En este punto, vale la pena mencionar que en etapas desarrollo, como la que se encuentra el proyecto, es probable que mucha información no esté disponible o bien todavía no se tenga datos experimentales fehacientes, en especial de composición de las corrientes, por lo que para algunas corrientes habrá que darle valores estimativos con un cierto criterio. Por lo tanto, teniendo en cuenta el nivel en el cual se encuentra el proyecto, los cálculos del BA se van a realizar solo para estimar los caudales de agua de cada corriente del proceso, con el fin de obtener un valor aproximado de consumo de agua neta de la instalación [SB-1] y poder compararlo con la capacidad de extracción máxima permitida [AS-1], como se mencionó en el párrafo anterior.

En la Tabla 3.4 se presentan los caudales máxicos de las corrientes de agua disponibles, en que fase se encuentra, el tipo de dato y una breve descripción de la corriente. Dichos datos fueron extraídos del balance de masa general del proceso presente en la memoria descriptiva de la Ingeniería preliminar para el CMFSCS (López, 2015). Solo se tuvo en cuenta los caudales de agua de las distintas corrientes, y para evitar problemas de variación en la densidad por temperatura o por concentración, se trabajo con caudales máxicos (t/año).

Podemos observar que en la Tabla 3.4 se ha distinguido en la tercer columna por tipo

Tabla 3.4. Datos de las corrientes del Balance de Agua para CMFSCS. Fuente: (López, 2015)

Corrientes Id	Fase	Tipo	Caudal Máxico t/año	Descripción
AS-1	L	D	262.800	Agua subterránea
C-1	V	D	26.280	Vapor vivo para calentamiento
C-2	V	D	17.520	Vapor usado en equipos de producción y calefacción
CAP-1	L	D	96.360	Agua de proceso
CAP-2	L	D	131.400	Agua de procesos
CAP-3	L	D	461.652	Agua de lavado LIX
CAP-4	L	D	5.256	Agua de lavado SX
CAP-5	L	I		Agua de proceso
CAP-6	L	I		Agua de proceso
CAP-7	L	I		Agua de proceso
DC-0	V	D		Agua evaporada (A-DC = 120.000m ²)
DC-1	L	I		Agua sobrenadante
DE-0	V	D		Agua evaporada (A-DE = 450.000m ²)
DE-1	L	I		Agua recirculada
EX-1	L	I		Agua + Impurezas
EX-2	L	D	11.388	Agua + Uranio
EX-3	L	D	11.388	Agua + Molibdeno
LIEC-1	L	D	33.288	Agua de lavado (Instalaciones + Efluentes Cloacales)
LIX-1	L-S	I		Lixiviado + Mineral agotado
NEC-1	L-S	D	236.520	Agua + Colas de mineral agotado neutralizadas
NEC-2	L	I		Aguas neutras con impurezas
ADU-1	L	I		Solución acuosa con NH ₄ SO ₃
MO-1	L	I		Solución acuosa con Na ₂ SO ₄ e impurezas
PD-1	L	I		Agua de alta calidad
PI-1	L-S	D	89.352	Precipitados húmedos
PI-2	L	I		Agua tratada recirculada
PS-1	L	D	15.768	Solución acuosa de NaCl
PS-2	L	D	15.768	Solución acuosa de Na ₂ CO ₃
PS-3	L	D	15.768	Solución ácida para regeneración del solvente
SSL-1	L	I		Lixiviado
SSL-2	L-S	D	136.656	Colas de mineral agotado (62,25 % p/p)
SB-1	L	I		Agua de proceso
TP-1	L-S	I		Agua + Mineral (50 % p/p)
TM-1	L-S	I		Agua + Mineral

de variable para el balance de agua (balance de masa). Las variables que son datos (D) son justamente las que sabemos de antemano el valor del caudal de esa corriente, debido a que la mayoría de estas variables dato constituyen restricciones impuestas al proceso de antemano al definir la capacidad de la planta (26 t/h de minera), otros son simplemente restricciones debido al proceso involucrado o simplemente estimaciones previas siguiendo algún criterio. Lógicamente, las variables incógnitas (I) no tiene definido su caudal, y son las que vamos a tener que calcular y evaluar su comportamiento. Finalmente, podemos hacer una aclaración con respecto a las corrientes [DC-0] y [DE-0] que si bien se las identificó como que fueran variables dato (D), su valor depende de un cálculo externo en función de parámetros geométricos de los diques o embalses y del déficit hídrico (DH) planteado en el apartado anterior.

Resolución del Balance de Agua en Matlab®- Simulink®

La resolución del balance se llevó a cabo en el entorno Matlab®-Simulink®, aprovechando las ventajas de este entorno para resolver sistemas de ecuaciones en forma gráfica. Simulink® es un entorno gráfico basado en diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Permite construir y simular modelos de sistemas físicos y sus sistemas de control mediante diagramas de bloques. Soporta tanto sistemas lineales como no lineales. El comportamiento de dichos sistemas se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab® y señales predefinidas de todo tipo. Si bien fue pensado y desarrollado para sistemas dinámicos, se puede utilizar perfectamente para la resolución de sistemas estáticos o en estado estacionario (Mathworks, 2016). La principal ventaja de este entorno es la posibilidad de generar un modelo de forma sencilla e intuitiva, con el que luego podemos evaluar distintas situaciones de forma rápida y optimizarlo.

En la Figura 3.6 se presenta el modelo del balance de agua para el Complejo Minero Fabril Cerro Solo en forma gráfica realizado en el entorno Simulink®, en el cual se observan en sus extremos todos los datos de entradas necesarios para resolver el modelo, y las salidas del modelo [SB-1] y [PE-0]. En este modelo, cada uno de los bloques representa los procesos planteados en el diagrama de bloques del balance de agua (Figura 3.5). En cada uno de estos bloques se plantea el balance de agua para cada uno de los procesos involucrados. También se observan distintos colores de los bloques, lo que ayuda a identificar como está planteado el balance: **Azul** balances tipo entrada \Rightarrow salida, **Rojo** balances tipo salida \Rightarrow entrada, **Verde** balances tipo (entrada - salida) \Rightarrow x, y **Naranja** balances que además necesitan cálculos extras para definir alguna de las corrientes. Ventajas que brindan los sistemas de resolución gráfica.

Si ingresamos en uno de estos bloques podemos ver como estan planteados estos balances. Por ejemplo, en la Figura 3.7 se puede observar la resolución gráfica del balance de agua en el interior del bloque para la *Cisterna de Agua de Proceso (verde)*. Se observa que el balance está planteado para obtener el caudal de alimentación de agua a la cisterna, el cual viene del Sistema de Bombeo [SB-1], por lo que se plantea como la sumatoria de las corrientes que salen de la cisterna menos la sumatoria de las corrientes que ingresan (Ecuación 3.2).

En la Figura 3.8 se presenta la resolución del balance para el *Dique de Evaporación (naranja)*, el cual a su vez posee un subbloque interno para el cálculo del volumen de agua que se elimina a la atmósfera por evaporación en el dique [DC-evap]. En este subsistema o subbloque (Figura 3.9) se calcula dicha corriente en función de los parámetros geométricos del dique (área del dique - [A_DE]) y del déficit hídrico de la zona [DH] (Ecuación 3.5).

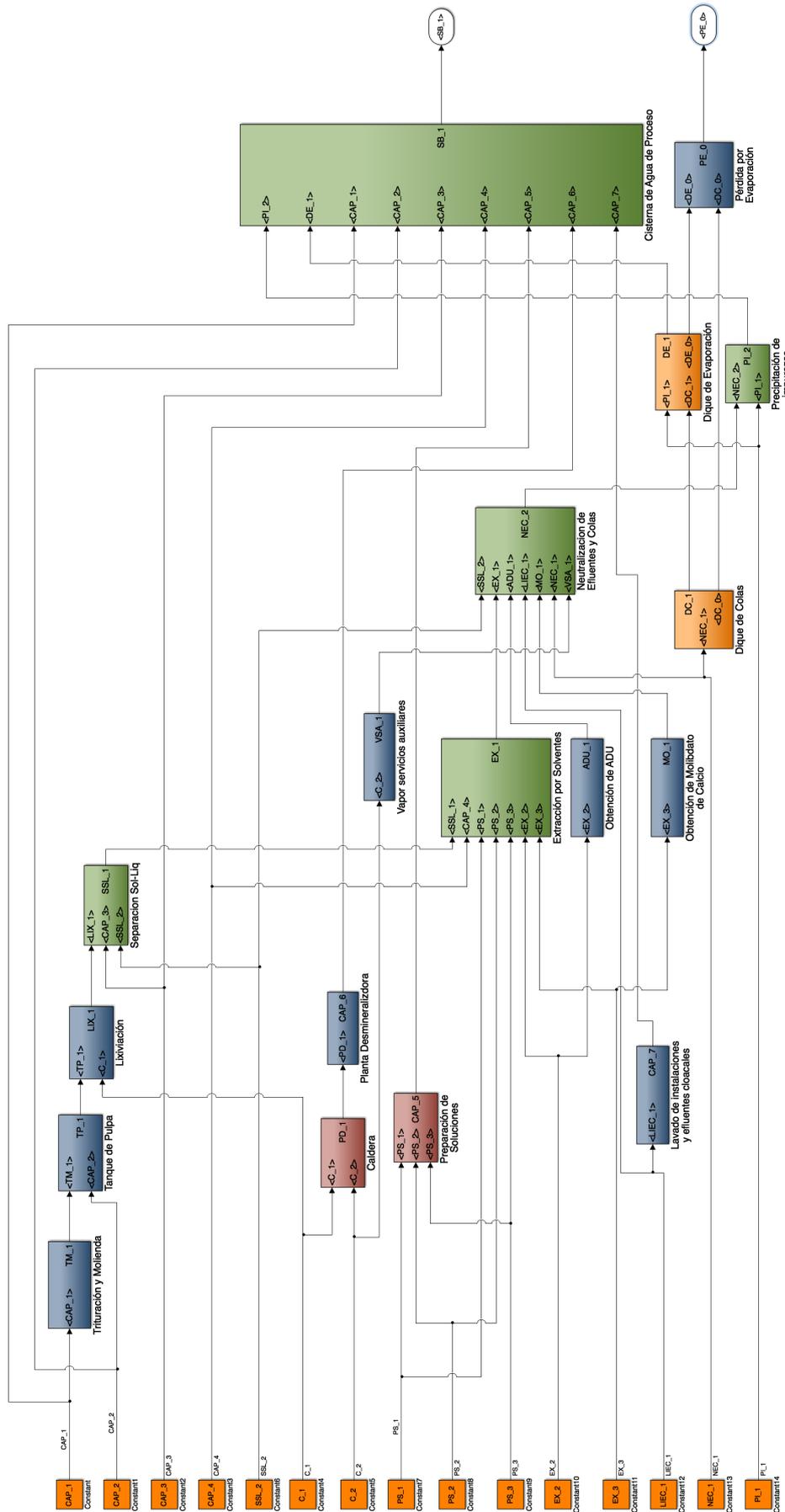


Figura 3.6. Modelo del Balance de Agua en Simulink®. Fuente: (Propia)

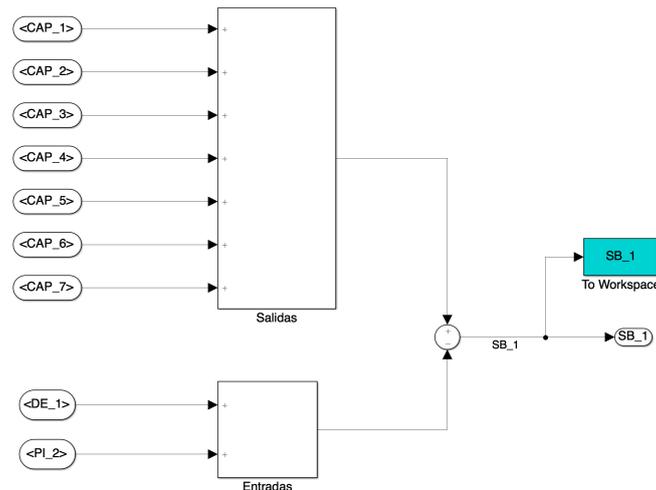


Figura 3.7. Modelo del Balance de Agua en la Cisterna de Agua de Proceso. Fuente: (Propia)

$$m_{SB-1}^{H_2O} = \left(m_{CAP-1}^{H_2O} + m_{CAP-2}^{H_2O} + m_{CAP-3}^{H_2O} + m_{CAP-4}^{H_2O} + m_{CAP-5}^{H_2O} + m_{CAP-6}^{H_2O} + m_{CAP-7}^{H_2O} \right) - \left(m_{DE-1}^{H_2O} + m_{PI-2}^{H_2O} \right) \quad (3.2)$$

También se puede observar en la figura Figura 3.8 que existe una operación condicional en este balance, debido a que si la evaporación [DE-evap] supera a la sumatoria de las corrientes líquidas que pueden ser evaporadas obtendríamos un vapor negativo para la corriente [DE-1] (Ecuación 3.3), lo que puede ocurrir si el dique esta sobredimensionado. Si esto llegara a pasar, la señal de la corriente de salida [DE-1] directamente se iguala a cero, de esta forma se salva este error de una manera bastante sencilla y práctica. Finalmente el balance se resuelve con la Ecuación 3.4. En el Apéndice 4 se presenta el script necesario para ejecutar la simulación y el detalle del resto de los bloques del proceso.

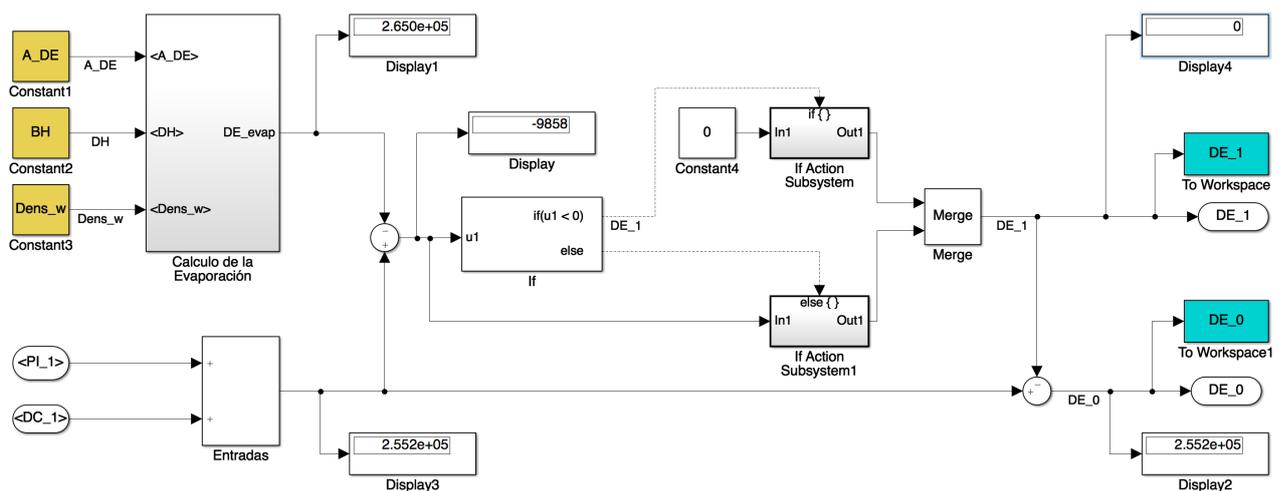


Figura 3.8. Modelo del Balance de Agua en el Dique de Evaporación. Fuente:(Propia)

$$\begin{cases} \text{si } \left(m_{PI-1}^{H_2O} + m_{DC-1}^{H_2O} \right) - m_{DE-evap}^{H_2O} \leq 0 & \Rightarrow m_{DE-1}^{H_2O} = 0 \\ \text{si } \left(m_{PI-1}^{H_2O} + m_{DC-1}^{H_2O} \right) - m_{DE-evap}^{H_2O} > 0 & \Rightarrow m_{DE-1}^{H_2O} = \left(m_{PI-1}^{H_2O} + m_{DC-1}^{H_2O} \right) - m_{DE-evap}^{H_2O} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$m_{DE-0}^{H_2O} = \left(m_{PI-1}^{H_2O} + m_{DC-1}^{H_2O} \right) - m_{DE-1}^{H_2O} \quad (3.4)$$

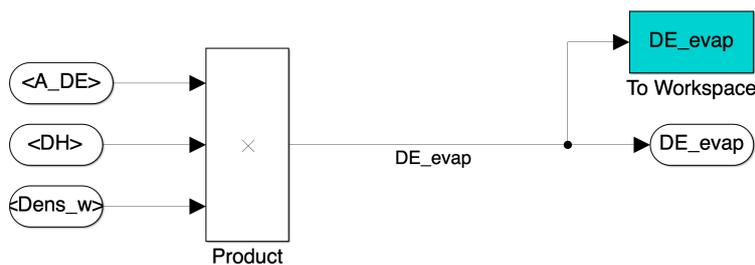


Figura 3.9. Cálculo de la evaporación. Fuente: (Propia)

$$m_{DE-evap}^{H_2O} [t/año] = \text{Área}_{DE} [m^2] * DH [m/año] * \rho^{H_2O} [t/m^3] \tag{3.5}$$

Finalmente, en la Tabla 3.5 se presenta los resultados de la simulación, es decir, del Balance de Agua para el Complejo Minero Fabril Cerro Solo partiendo de los datos de la memoria descriptiva de la ingeniería preliminar para la instalación (López, 2015).

Tabla 3.5. Resultados del Balance de Agua para el CMFCS. Fuente: (Propia)

Corrientes Id	Caudal Másico t/año
AS-1	262.800
C-1	26.280
C-2	17.520
CAP-1	96.360
CAP-2	131.400
CAP-3	461.652
CAP-4	5.256
CAP-5	47.304
CAP-6	43.800
CAP-7	33.288
DC-0	70.680
DC-1	165.840
DE-0	265.050
DE-1	0
EX-1	608.820
EX-2	11.388
EX-3	11.388
LIEC-1	33.288
LIX-1	254.040
NEC-1	236.520
NEC-2	582.540
ADU-1	11.388
MO-1	11.388
PD-1	43.800
PE-0	325.872
PI-1	89.352
PI-2	493.188
PS-1	15.768
PS-2	15.768
PS-3	15.768
SSL-1	579.036
SSL-2	136.656
SB-1	325.872
TP-1	227.760
TM-1	96.360

3.2.4. Evaluación de los resultados obtenidos en el balance

En base a los resultados obtenidos para el balance de agua (Tabla 3.5) podemos hacer un listado con las observaciones más importantes:

- El consumo neto de la instalación ([SB-1]) es de **325.872 t/año** ($\approx 0,326 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$), representa el agua que debería suministrar el sistema de bombeo de agua subterránea para una correcta operación de la planta. El consumo bruto definido como la totalidad del agua que demandan los procesos para la operación de la planta (Ecuación 3.6) es de 819.060 t/año ($\approx 0,819 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$). Estos valores le dan a la instalación un valor consumo de agua de **1,43 m³/t**. Valores que si lo comparamos con la Tabla 1.3 del capítulo introductorio son bajos a nivel de consumo anual, pero altos a nivel de consumo por tonelada de mineral procesado. Si bien las leyes de los minerales de uranio son muy bajas, lo que implica un mayor procesamiento del mineral, este último valor podría estar indicando que el proceso global podría ser optimizado para mejorar su rendimiento con respecto al consumo de agua.

$$Consumo_{\text{Bruto}} = \left(m_{\text{CAP-1}}^{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CAP-2}}^{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CAP-3}}^{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CAP-4}}^{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CAP-5}}^{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CAP-6}}^{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CAP-7}}^{\text{H}_2\text{O}} \right) = 819.060 \text{ t/año} \quad (3.6)$$

- El caudal de suministro a la cisterna de agua de proceso [SB-1] es superior al caudal máximo de extracción del acuífero subterráneo [AS-1] ($m_{\text{SB-1}}^{\text{H}_2\text{O}} > 262.800 \text{ t/año}$). Esto está indicando que el consumo neto de agua estimado para la futura instalación supera al disponible en la zona ($750 \text{ m}^3/\text{día}$), lo que representará un problema de operación a futuro. Podemos ver que la relación de caudales entre ambas corrientes es de 1,24 (Ecuación 3.7), es decir, que se requiere un 24 % más de lo permitido para una correcta operación. La reducción en los requerimiento de extracción de agua de la instalación es un punto que debe estudiarse con mas detalle, si se quiere mantener estos niveles de producción.

$$r_{\text{extracción}} = \frac{\left(m_{\text{SB-1}}^{\text{H}_2\text{O}} \right)}{\left(m_{\text{AS-1}}^{\text{H}_2\text{O}} \right)} = 1,24 \quad (3.7)$$

- La corriente [DE-1] es igual a cero, lo que esta indicando que la evaporación del agua en el Dique de Evaporación (DE) es superior al agua que ingresa a este. El embalse podría estar sobredimensionado, probablemente por estar trabajando sobre un diseño preliminar, además de que depende también del valor de déficit hídrico (DH) que se haya considerado. Lo importante en este punto es evaluar el nivel de pérdida de agua por evaporación en relación al consumo bruto de la planta (Ecuación 3.8), el cual para este caso es del 39,79 %, lo que puede considerarse como un número alto teniendo en cuenta que en este análisis no se han considerado otras pérdidas por evaporación. Como por definición lo que entra es igual a lo que sale ([SB-1] = [PE-0]), este valor coincide con el porcentaje de reposición de agua nueva. Lógicamente, la fracción complementaria (60,21 %) representa el porcentaje de recuperación, teniendo en cuenta que no hay descarga directa como agua líquida al ambiente, es decir, lo que no se evapora, se recircula nuevamente al proceso. En la Ecuación 3.9 se presenta el cálculo para este porcentaje.

$$r_{\text{evaporación}} = \frac{\left(m_{\text{PE-0}}^{\text{H}_2\text{O}} \right)}{\left(m_{\text{CAP-1}}^{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CAP-2}}^{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CAP-3}}^{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CAP-4}}^{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CAP-5}}^{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CAP-6}}^{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CAP-7}}^{\text{H}_2\text{O}} \right)} = 0,3979 \quad (3.8)$$

$$r_{\text{recirculación}} = \frac{\left(m_{PI-2}^{H_2O} + m_{DE-1}^{H_2O} \right)}{\left(m_{CAP-1}^{H_2O} + m_{CAP-2}^{H_2O} + m_{CAP-3}^{H_2O} + m_{CAP-4}^{H_2O} + m_{CAP-5}^{H_2O} + m_{CAP-6}^{H_2O} + m_{CAP-7}^{H_2O} \right)} = 0,6021 \tag{3.9}$$

- Estudiando el caudal de las distintas corrientes para el balance de agua podemos observar que siete de las corrientes están por arriba del caudal de extracción máximo establecido, en algunos casos hasta duplica este valor (Figura 3.10). Estas corrientes de menor a mayor son: [PE-0], [SB-1], [CAP-3], [PI-2], [SSL-1], [NEC-2] y [EX-1]. De las primeras dos ([PE-0] y [SB-1]) ya las hemos evaluado en los comentarios anteriores, al igual que la corriente [PI-2] que representa básicamente la recirculación de agua a la cisterna de agua de proceso. Las restantes cuatro podemos observar en el diagrama de bloques para el balance de agua (Figura 3.5) que están relacionadas, y que básicamente una es continuación de la otra ([CAP-3] → [SSL-1] → [EX-1] → [NEC-2]) lo que explica su orden creciente. En este punto es importante identificar que la que verdaderamente aporta caudal a la serie de corrientes es [CAP-3], por lo que el proceso que demanda este volumen de agua debería de ser estudiado con más detalle. En base a la información detallada en la Subsección 3.1.2, sabemos que esta cantidad de agua es utilizada para lavar el mineral agotado que abandona el proceso de lixiviación ácida y separada del mineral, junto al lixiviado, en decantadores a contracorriente. En base a los resultados del balance de agua, podemos agregar además que en este proceso el lixiviado se diluye 2,28 veces (Ecuación 3.10). Este parámetro está dentro del rango que normalmente se trabaja en la industria minera, pero no por ello no podría ser optimizado.

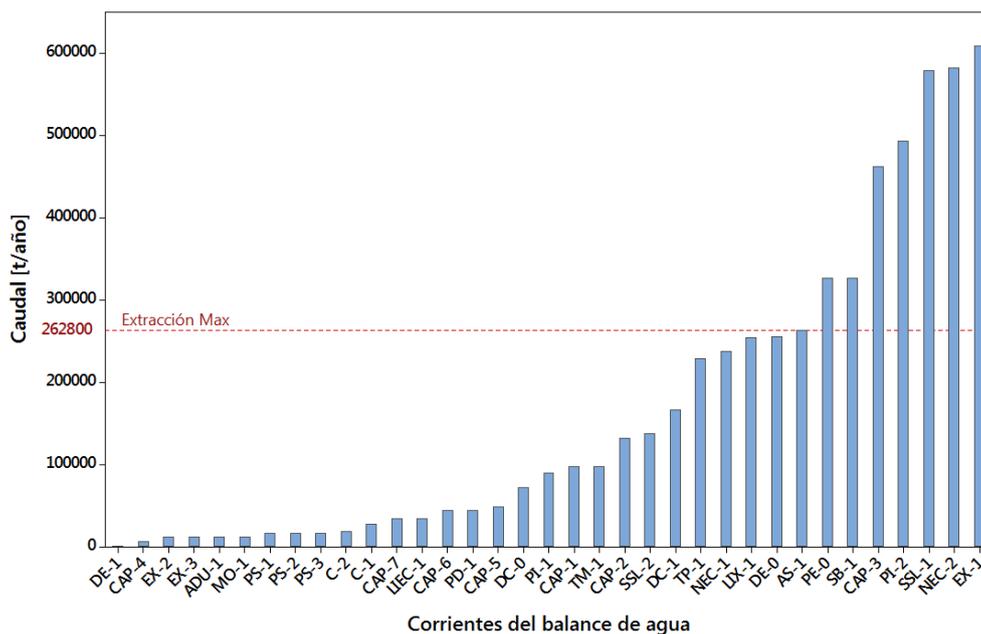


Figura 3.10. Distribución de las corrientes del BA en función del caudal. Fuente: (Propia)

$$f_{\text{dilución}}^{SSL} = \frac{\left(m_{SSL-1}^{H_2O} \right)}{\left(m_{LIX-1}^{H_2O} \right)} = 2,28 \tag{3.10}$$

- Finalmente, si estudiamos el consumo de agua para los distintos procesos involucrando todos los usos en la instalación, es posible comprender mejor el sistema. En la Tabla 3.6 se presentan los distintos usos del agua dentro de la instalación, a que corrientes involucra

y cual es su valor numérico. En esta tabla se discrimina a la etapa de lixiviación de la de lavados de mineral agotado (Lavado SSL), y en otros usos se incluye no solo al agua para limpieza de las instalaciones y efluentes cloacales, definidos en el balance de agua, sino también al uso de agua como vapor para los servicios auxiliares. Para la etapa de extracción por solventes se considera a las soluciones que participan en las etapas de reextracción, lavado y acondicionamiento del solvente.

Tabla 3.6. Usos del agua en el CMFCS. Fuente: (Propia)

Uso del Agua	Corrientes Id	Caudal Másico t/año
Otros usos	CAP-7 + C-2	50.808
Extracción SX	PS-1/2/3 + CAP-4	52.560
Lixiviación	CAP-1/2 + C-1	254.040
Extracción Max	AS-1	262.800
Consumo Neto	SB-1	325.872
Pérdida Evap	PE-0	325.872
Lavado SSL	CAP-3	461.652
Recirculación	PI-2 + DE-1	493.188
Consumo Bruto	CAP-1/2/3/4/5/6/7	819.060

En la Figura 3.11 se presentan estos valores en relación al consumo bruto de la instalación. En la gráfica se puede observar las relaciones entre los distintos usos del agua. En principio podemos decir que el consumo de agua en el proceso de extracción por solventes tiene relativa menos importancia que el consumo de agua en la lixiviación o lavado de los minerales en los separadores sólido-líquido. El consumo de agua para otros usos no aparenta ser importante, aunque a este nivel de estudio el valor probablemente esté subestimado. Una relación importante se observa entre el consumo de agua para la lixiviación, el consumo neto (o la pérdida por evaporación) y la máxima extracción de agua del acuífero, alcanzando porcentajes similares sobre el consumo bruto. Esto en principio se podría entender como que toda el agua que se utiliza para la lixiviación propiamente dicha es agua limpia de extracción del acuífero, por lo que esta etapa podría quedar limitada a la máxima capacidad de extracción. Algo similar ocurre entre el lavado de los minerales (Lavado SSL) y la recirculación de agua, lo que podría entenderse como que toda, o la mayoría, del agua que se recircula es utilizada en la etapa de lavado.

3.3. PROPUESTA DE MEJORA PARA EL BALANCE DE AGUA DEL CMFCS

Como se remarcó en el apartado anterior, el balance de agua de la instalación debe ser tal que se satisfaga la única restricción real que le impone el ambiente, que es la capacidad máxima de extracción de agua del acuífero confinado. Para lograr este cometido sin que se vea comprometido el nivel de producción de concentrado de uranio, es decir, manteniendo el nivel de mineral procesado ($26\text{t/h} \approx 227.000\text{ t/año}$), se debe estudiar no solo la forma de aumentar la recuperación de agua disminuyendo las pérdidas u optimizando el consumo en procesos que así lo permitan, sino también evaluar la gestión del agua dentro de la planta. Esto hace que un estudio general sobre las posibles mejoras en el balance de agua de la instalación sea necesario.

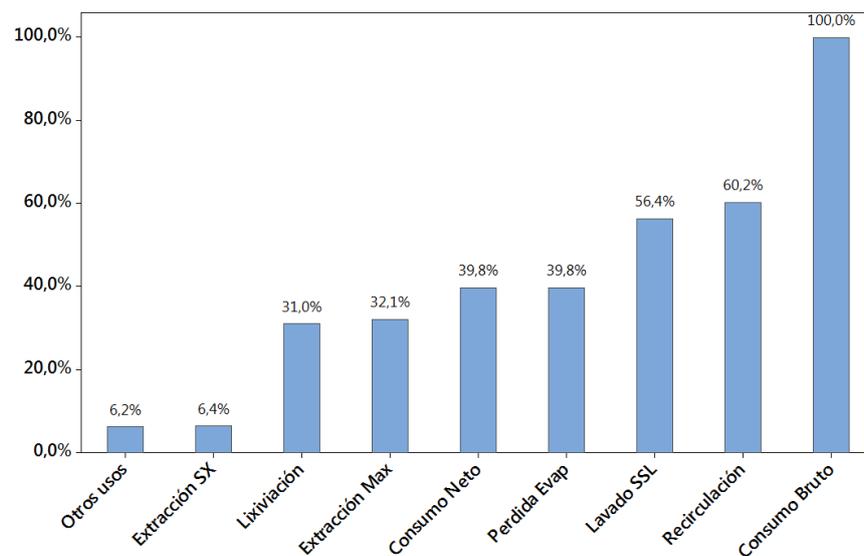


Figura 3.11. Relación entre los distintos uso del agua y el Consumo Bruto para el CMFSCS. Fuente: (Propia)

3.3.1. Puntos de mejora del Balance de Agua original para CMFCS

En base a la información relevada en el marco teórico, la memoria descriptiva de la ingeniería preliminar de Complejo Minero Fabril Cerro Solo (López, 2015) y los resultados del balance de agua de la instalación, se pueden plantear algunos puntos débiles que presenta el balance de agua planteado que se deberían estudiar. A continuación se lista estos y unos breves comentarios al respecto:

- **Requerimientos de extracción de agua del acuífero**

Este tema ya fue bastante bien abordado en la sección anterior, pero no podemos dejar de remarcar que es el punto más importante a estudiar, del cual depende fuertemente el éxito del proyecto. No solo desde el punto de vista técnico-económico, sino también, desde el punto de vista ambiental, el cual por las características del caso puede tener un peso importante.

- **Recuperación y Recirculación de las aguas**

El balance de agua original de la instalación, ya cuenta con un volumen de agua recirculada, que como se puede observar en los resultados llega al 60% del consumo bruto. Si bien, este valor no es despreciable, la tendencia mundial de la minería es llevar el porcentaje de reutilización y recirculación por encima del 80%. Para el caso en estudio, lograr este cometido puede ser más que interesante en pos de disminuir el requerimiento de extracción de agua.

- **Pérdidas por evaporación**

También fue un punto mencionado en base a los resultados del balance de agua, pero para el caso estudiado, en los cálculos solo se tuvieron en cuenta las pérdidas por evaporación en el dique de cola y en el dique de evaporación, que si bien son volúmenes importantes, no van a ser las únicas pérdidas por evaporación. Existe una pérdida importante de agua por evaporación en los procesos de control de polvo y riego de caminos en los laboreo mineros, como se vió en el marco teórico, el cual no fue cuantificado para este caso. Si bien es de por sí un dato difícil de cuantificar, se debería tener un margen

de seguridad en vista a esta posible pérdida. Además existen pérdidas en todos los equipos de procesos que estén abiertos a la atmósfera, como tanques de almacenamiento, espesadores y decantadores, es decir, equipos con grandes superficies de agua expuestas a la atmósfera. Otro punto a destacar relacionado con las pérdidas por evaporación es el déficit hídrico (DH), que si bien se ha estimado a partir de una serie temporal grande, lo que estadísticamente es favorable, el cálculo no está desarrollado exactamente para este fin, sino para realizar el balance hídrico del terreno. Por lo que se debe tener en cuenta en el momento del diseño de los diques o embalses de evaporación.

■ **Problemas con la calidad de las aguas**

En el diagrama de bloques del balance de masa original (Figura 3.5) no hay una discriminación en cuanto a la calidad del agua de proceso requerida, a excepción del agua que alimenta a las calderas que posee una planta de desmineralización para alcanzar la calidad requerida. El agua que utilizan los demás procesos es suministrada por la cisterna de agua de procesos, la cual a su vez se abastece en cerca de un 40 % por agua subterránea del acuífero, y el 60 % restante, con agua recirculada del proceso de precipitación de impurezas. La calidad del agua del acuífero no es apta para el consumo humano, sin embargo si para uso industrial, aunque su salinidad puede variar dependiendo del lugar exacto de extracción. Mas allá de la calidad del agua del acuífero, la eficiencia en los procesos de neutralización y precipitación de impurezas juega un papel importante a la hora de evaluar la calidad del agua de la Cisterna de Agua de Proceso. Estas aguas indefectiblemente tendrán trazas de elementos como uranio, radio-226, molibdeno, y demás impurezas que se distribuirán a todos los procesos gracias a la recirculación. Incluso podrían tener niveles considerables de cloruros y amoníaco, utilizados en los procesos de Extracción por Solventes y de Obtención de ADU respectivamente, debido a poseer una etapa de neutralización conjunta para todas las aguas residuales. Estos dos elementos pueden causar importantes problemas de corrosión en los equipos de procesos de la planta. El amoníaco además es una sustancia muy tóxica y debe evitarse la distribución del mismo a toda la planta debido a que aumenta el riesgo de fugas al ambiente. Materia orgánica también es posible que se detecte, debido a incluir en esta etapa de neutralización general, las aguas residuales provenientes de los efluentes cloacales y de limpieza de la instalación. Por último, las soluciones de reextracción y acondicionamiento del solvente en la etapa de extracción tienen que tener una calidad superior a la del agua subterránea, debido al nivel de purificación para uranio que se busca. Los procesos de molienda, lixiviación y separación sólido-líquido, no requieren una calidad del agua tan elevada, pero si necesitan tener una purga para eliminar impurezas y no sobrepasar una determinada concentración de impurezas. Finalmente, podemos mencionar que si bien la corriente [DE-1] para el caso en estudio es igual a cero, esta corriente no sería recomendable que se enviara sin ningún tratamiento a la cisterna de agua de proceso, debido a que la calidad del agua en el dique de evaporación podría llegar a ser de bastante menor calidad que la corriente de recirculación [PI-2]. Las aguas que llegan al dique de evaporación en un 65 % provienen del dique de colas neutralizadas, sin tratamiento de impurezas.

■ **Tratamiento de las aguas residuales**

En base a todo lo mencionado en este punto, se deduce que un proceso de neutralización general, seguido de una precipitación de impurezas, dependiente de qué elemento se necesite precipitar para obtener una calidad aceptada no sería lo mas recomendable. En estos casos se requiere un tratamiento discriminado de las aguas residuales, dependiendo de las particularidades del caso se pueden usar dos o más tratamientos.

3.3.2. Estudio de las pérdidas por evaporación en los equipos

En función de lo que se mencionó en el apartado anterior, las pérdidas por evaporación en los equipos expuestos al ambiente podrían llegar a ser importantes. Por lo que una cuantificación de las mismas podría darnos una idea de la magnitud de estas pérdidas. Los cálculos aquí presentados se realizarán en base a datos geométricos del diseño preliminar de los equipos de procesos presentados en la memoria descriptiva (López, 2015). En la Tabla 3.7 se estiman las pérdidas de agua por evaporación al ambiente para los equipos mas importantes del CMFSCS. Como se puede observar en ninguno de los procesos, a excepción del dique de colas y del dique de evaporación que fueron diseñados para tal fin, las pérdidas de agua superan el 0,5 % sobre el total de pérdida por evaporación, ni superan el 0,5 % en relación al caudal que ingresa en cada uno de estos procesos. Por lo que no se los tendrá en cuenta para futuros cálculos. Vale la pena aclarar que el porcentaje de 103 % para el dique de evaporación representa que este tiene mas capacidad de evaporación que la requerida, tal como se mencionó en la sección anterior.

Tabla 3.7. Pérdida de agua por evaporación en los equipos de procesos. Fuente: (Propia)

Procesos	$S_{expuesta}$ m ²	$V_{evaporado}$ m ³ /año	$\frac{V_{evaporado}}{V_{total\ evaporado}}$
Cisterna de agua de proceso	750	442	0,13 %
Tanque de Pulpa	77	45	0,01 %
Separación Sol-Liq	2.199	1.295	0,38 %
Neutralización de Efluentes y Colas	327	192	0,06 %
Precipitación de impurezas	92	54	0,02 %
Dique de colas	120.000	70.680	20,93 %
Dique de evaporación	450.000	265.050	78,47 %
Total		337.759	100,00 %

Procesos	$V_{evaporado}$ m ³ /año	$V_{ingreso}$ m ³ /año	$\frac{V_{evaporado}}{V_{ingreso}}$
Cisterna de agua de proceso	442	325.872	0,14 %
Tanque de Pulpa	45	227.760	0,02 %
Separación Sol-Liq	1.295	715.692	0,18 %
Neutralización de Efluentes y Colas	192	819.060	0,02 %
Precipitación de impurezas	54	582.540	0,01 %
Dique de colas	70.680	236.520	29,88 %
Dique de evaporación	265.050	255.192	103,86 %

Cabe mencionar que existen pérdidas por evaporación en el proceso de lixiviación, pero estas no se rigen por el déficit hídrico del lugar de instalación, sino por la diferencia de temperatura entre el lixiviado y la atmósfera que actúa como fuerza impulsora para la transferencia de masa. Este proceso requiere de un nivel más sofisticado de cálculo y más especificaciones del proceso, ya que por ser vapores ácidos generalmente son recuperados en parte y su liberación al ambiente está regulada. Por lo que, con el nivel de detalle que se está trabajando no es posible estimarlo y se puede considerar que está dentro del error general del balance. Obtener datos experimentales de este fenómeno y especificaciones técnicas del sistema de recuperación de los vapores deben considerarse como trabajos a futuro dentro del proyecto.

Finalmente, como resultado de este estudio, podemos decir que el error que se comete al no considerar las pérdidas por evaporación en el balance de agua, al nivel de detalle con el que se está trabajando, es despreciable. Por lo que no van a ser consideradas en los nuevos cálculos.

3.3.3. Nuevo sistema de gestión del agua para la instalación

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para el balance de agua del CMFCS en la Sección 3.2, los puntos mencionados en los apartados anteriores y la teoría consultada, se propone un nuevo sistema de gestión del agua dentro de la instalación buscando no solo reducir el consumo neto de agua o requerimientos de extracción, sino también anticipar problemas futuros de operación en relación a la calidad de las aguas. El nuevo diagrama de bloques para el balance de agua de la instalación se presenta en la Figura 3.12, donde no solo se pueden apreciar modificaciones en la distribución de las corrientes, sino también en los procesos utilizados.

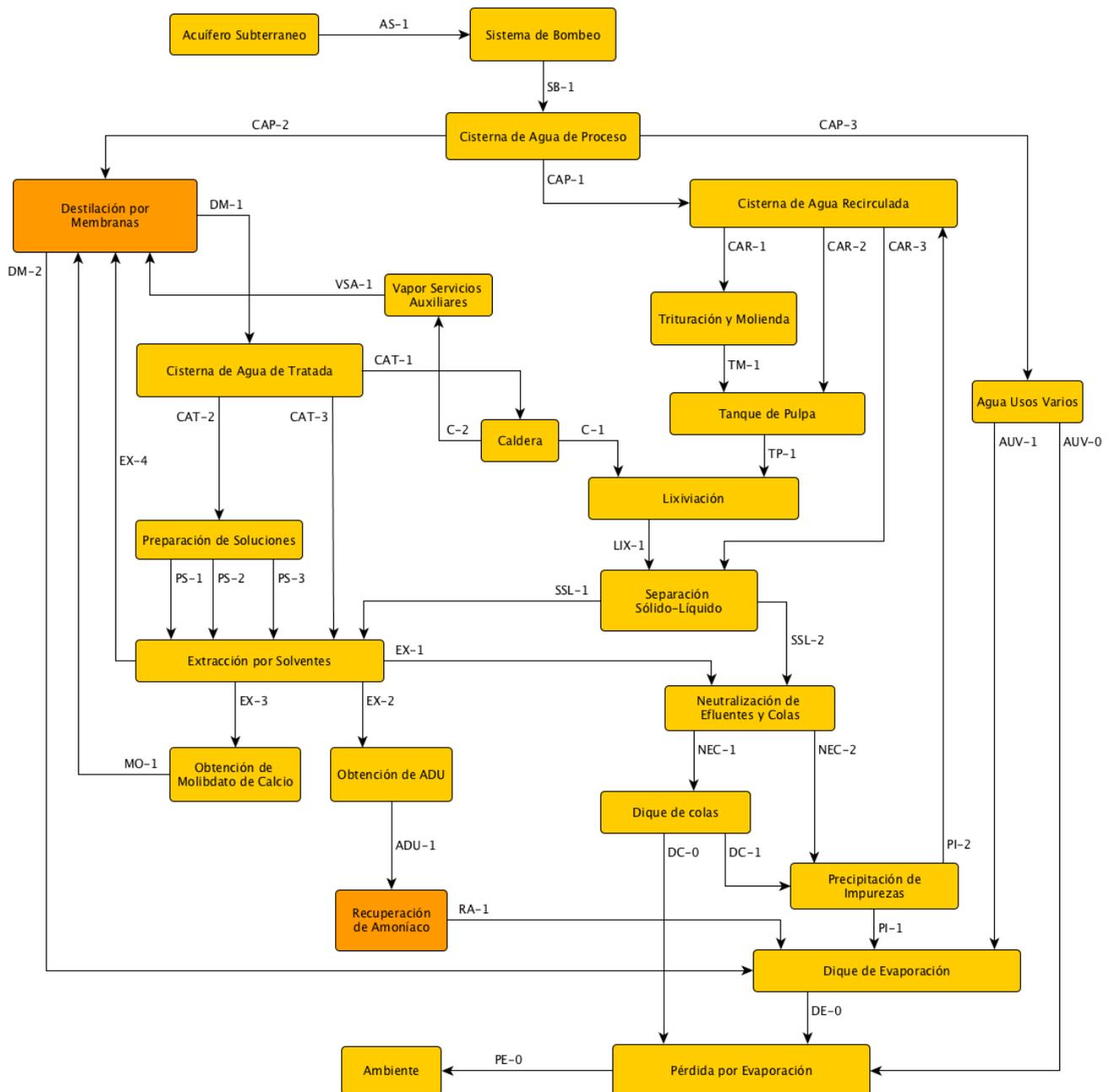


Figura 3.12. Diagrama de Bloques Modificado para el Balance de Agua del CMFCS. Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.8 se presenta el listado de las corrientes con su fase, origen y destino dentro del diagrama de bloques. En este nuevo diagrama de bloques se pueden identificar tres sistemas de distribución de agua con algunas corrientes compartidas entre ellos. El objetivo de esta distribución es el de discriminar entre tres calidades de agua dentro de la instalación, las cuales se listan a continuación en orden de calidad decreciente:

- **Agua Tratada:** Esta es el agua de mejor calidad, la cual debería ser tal que se pueda utilizar sin inconvenientes en los procesos de purificación y concentración (*Extracción por Solventes, Obtención de ADU y Obtención de Molibdato de Calcio*), así como también para la generación de vapor en la *Caldera*.
- **Agua de Proceso:** Podemos decir que presenta una calidad media, y que hace referencia a la calidad final con la que se obtenga el agua subterránea del acuífero. Es utilizada para suministrar agua a los otros dos sistemas (*Destilación por Membranas y Cisterna de Agua Recirculada*), y para el resto de los requerimientos secundarios de la planta (*Agua Usos Varios*).
- **Agua Recirculada:** Es la de peor calidad de las tres, debido principalmente a que está compuesta en mayor porcentaje por el agua que es recirculada desde el proceso de precipitación de impurezas. Es utilizada en las etapas donde interviene el mineral, que son las etapas que mas demandan agua y donde existen una gran cantidad sales disueltas y sólidos en suspensión (*Trituración y Molienda, Tanque de Pulpa y Separación Sólido-Líquido*).

Una de las principales modificaciones a nivel de los procesos es la incorporación de dos nuevas cisternas: Cisterna de Agua Tratada y Cisterna de Agua Recirculada, con la finalidad de hacer de pulmón de abastecimiento para los requerimientos de los procesos siguientes. La principal característica de este sistema es que esas aguas se recirculan de forma independiente, y solo tienen un punto de contacto real cuando el vapor que aporta la Caldera ingresa al proceso de Lixiviación. En la etapa de extracción por solventes no existe contacto tal que el agua de [SSL-1] pueda entrar en el ciclo de recirculación del agua tratada, debido a que este volumen de agua entra en contacto solamente con el solvente, para disolver al uranio y al molibdeno en la fase orgánica, y luego este refinado acuoso junto al agua de lavado del solvente [CAT-3] se van por la corriente [EX-1] a la etapa de *Neutralización de Efluentes y Colas*. De esta manera, el uranio, el radio-226 y todas las demás impurezas que puedan disolverse en la lixiviación del mineral, no entran en el sistema de agua tratada.

Podemos identificar cambios en la etapa de *Neutralización de Efluentes y Colas* con respecto al balance de agua original (Figura 3.5), debido a que ya no llegan las corrientes residuales de los procesos de *Extracción por Solventes, Obtención de ADU y Obtención de Molibdato de Calcio*, ni tampoco las corrientes residuales de los demás usos de la planta (*Agua Usos Varios*). El objetivo de esta modificación, como se hizo mención en el apartado anterior, es que los cloruros, el amoniaco y la materia orgánica no entren en el sistema de agua recirculada. Por tal motivo, podemos observar que las corrientes residuales del proceso de *Obtención de ADU* pasan a través de un proceso de recuperación de amoniaco para finalmente terminar evaporándose en el dique de evaporación.

También se observa una modificación en la etapa llamada anteriormente *Lavado de Instalaciones y Efluentes Cloacales*, por la que aparece en el nuevo diagrama de bloques llamada *Agua Usos Varios*. Bajo este nuevo nombre, se incluye a las pérdidas por evaporación para el control de polvo o riego de caminos y al resto de las operaciones secundarias de la instalación que demanden agua. Se puede observar como su corriente residual líquida se envía

directamente al dique de evaporación, sin pasar por la etapa de neutralización, debido a que no deberían ser aguas muy ácidas ni con elementos peligrosos disueltos, y en caso contrario, su volumen pequeño se diluiría en el gran volumen del dique de evaporación. Lo que se evapora si se considera una *Pérdida por Evaporación*.

La última modificación importante se observa, en el agregado de una etapa de tratamiento de agua por *Destilación por Membranas*. Con este proceso se logra alcanzar la calidad del agua requerida, incluso para ingresar en calderas, con una recuperación del agua superior al 75 % y con la posibilidad de utilizar calor residual de la caldera como fuente térmica. Este proceso es alimentado por las aguas residuales del proceso de Obtención de Molibdato de Calcio, las aguas ácidas de regeneración del solvente, el condensado del vapor de los servicios auxiliares, y con agua de proceso para completar los requerimientos. Como resultado del proceso, se obtienen dos corrientes: el permeado con el agua recuperada [DM-1] y el rechazo con el agua residual del proceso [DM-2].

Otra diferencia que se puede apreciar con respecto al balance de agua original, es que el agua sobrenadante que se recupera de las colas de mineral [DC-1*], no se envía directamente

Tabla 3.8. Corrientes del Balance de Agua Modificado. Fuente: (Propia)

Corrientes		Origen	Destino
Id	Fase		
AS-1	L	Acuífero Subterráneo	Sistema de Bombeo
AUV-1	L	Agua Usos Varios	Dique de Evaporación
AUV-0	V	Agua Usos Varios	Pérdida por Evaporación
C-1	V	Caldera	Lixiviación
C-2	V	Caldera	Vapor Servicios Auxiliares
CAP-1	L	Cisterna de Agua de Proceso	Cisterna de Agua Recirculada
CAP-2	L	Cisterna de Agua de Proceso	Cisterna de Agua Tratada
CAP-3	L	Cisterna de Agua de Proceso	Agua Usos Varios
CAR-1	L	Cisterna de Agua Recirculada	Trituración y Molienda
CAR-2	L	Cisterna de Agua Recirculada	Tanque de Pulpa
CAR-3	L	Cisterna de Agua Recirculada	Separación Sólido-Líquido
CAT-1	L	Cisterna de Agua Tratada	Caldera
CAT-2	L	Cisterna de Agua Tratada	Preparación de Soluciones
CAT-3	L	Cisterna de Agua Tratada	Extracción por Solventes
DM-1	L	Destilación por Membranas	Cisterna de Agua Tratada
DM-2	L	Destilación por Membranas	Dique de Evaporación
DC-0	V	Dique de Colas	Pérdida por Evaporación
DC-1	L	Dique de Colas	Precipitación de Impurezas
DE-0	V	Dique de Evaporación	Pérdida por Evaporación
EX-1	L	Extracción por Solventes	Neutralización de Efluentes y Colas
EX-2	L	Extracción por Solventes	Obtención de ADU
EX-3	L	Extracción por Solventes	Obtención de Molibdato de Calcio
EX-4	L	Extracción por Solventes	Destilación por Membrana
LIX-1	L-S	Lixiviación	Separación Sólido-Líquido
NEC-1	L-S	Neutralización de Efluentes y Colas	Dique de Colas
NEC-2	L	Neutralización de Efluentes y Colas	Precipitación de Impurezas
ADU-1	L	Obtención de ADU	Recuperación de Amoníaco
MO-1	L	Obtención de Molibdato de Calcio	Destilación por Membrana
PI-1	L-S	Precipitación de impurezas	Dique de Evaporación
PI-2	L	Precipitación de impurezas	Cisterna de Agua Recirculada
PS-1	L	Preparación de Soluciones	Extracción por Solventes
PS-2	L	Preparación de Soluciones	Extracción por Solventes
PS-3	L	Preparación de Soluciones	Extracción por Solventes
RA-1	L	Recuperación de Amoníaco	Dique de Evaporación
SSL-1	L	Separación Sólido-Líquido	Extracción por Solventes
SSL-2	L-S	Separación Sólido-Líquido	Neutralización de Efluentes y Colas
SB-1	L	Sistema de Bombeo	Cisterna de Agua de Proceso
TP-1	L-S	Tanque de Pulpa	Lixiviación
TM-1	L-S	Trituración y Molienda	Tanque de Pulpa
VSA-1	L	Vapor Servicios Auxiliares	Destilación por Membrana

al *Dique de Evaporación*, sino que se la dirige a la etapa de *Precipitación de Impurezas* con el fin de recircular este volumen de agua y que no se pierda por evaporación. Además la corriente [DE-1] ya no existe, debido a que la calidad del agua del *Dique de Evaporación* no es apta para ser recirculada.

Finalmente, vale la pena hacer un comentario sobre el tratamiento de las aguas residuales de la lixiviación del mineral que abandonan la etapa de extracción por solventes [EX-1] y las que provienen de la separación sólido-líquido [SSL-2]. Este proceso que incluye la *Neutralización de Efluentes y Colas* y la *Precipitación de Impurezas* no fue modificado en su totalidad, si bien los estudios bibliográficos indican que no son los más eficientes con respecto al consumo de agua, debido fundamentalmente a dos factores: el gran volumen de caudal que hay que tratar y la experiencia que posee la industria minera del uranio en el tema, en especial la CNEA. El proceso de neutralización logra consolidar la precipitación del uranio en solución presente en esta agua residual, así como también precipitar la mayor cantidad de metales, azufre y demás elementos peligrosos. Y finalmente, el proceso de *Precipitación de impurezas*, logra disminuir las trazas de elementos peligrosos como el radio-226. Lógicamente, trazas de estos elementos se van a recircular, pero solo lo van a hacer dentro de este sistema de agua recirculada, con lo cual el sistema de gestión del agua mejora su desempeño. Y como parte de esta agua se evapora [PI-1], el sistema se purga con el ingreso de agua de proceso nueva.

3.4. MODELO, SIMULACIÓN Y RESOLUCIÓN DEL NUEVO BALANCE DE AGUA

En esta sección se plantea el nuevo modelo para la resolución del balance de agua de la instalación según la nueva distribución del agua (Figura 3.12). Se realizaron simulaciones del proceso con el nuevo modelo desarrollado, estudiando los parámetros más importantes. Se analizaron también los resultados del balance de agua con y sin el proceso de recuperación de agua por Destilación por Membranas.

3.4.1. Modelo para el Nuevo Balance de Agua

Para el desarrollo del modelo para la nueva distribución del agua dentro de la futura instalación, al igual que para el primero, se utilizó el entorno Matlab®-Simulink® aprovechando las ventajas mencionadas en la sección anterior. En la Figura 3.13 se presenta el modelo en forma gráfica. A diferencia del anterior, los colores de los bloques en la figura representan los sistemas con distintas calidades de agua: **Celeste** = Agua tratada, **Verde** = Agua de proceso (agua subterránea), **Rojo** = Agua Recirculada, y finalmente, el **Naranja** representa a los procesos donde intervienen agua con más de una calidad.

En esta representación del modelo se puede observar la incorporación de los nuevos procesos, la eliminación de otros y los cambios en las conexiones de las líneas, según el nuevo diagrama de bloques. Otra diferencia que se observa en la representación, es la reducción de las constantes que, en el modelo anterior definían las corrientes de algunos de los procesos. Para este nuevo modelo se parametrizaron las corrientes con factores en función de los resultados obtenidos en el primero modelo (Tabla 3.5).

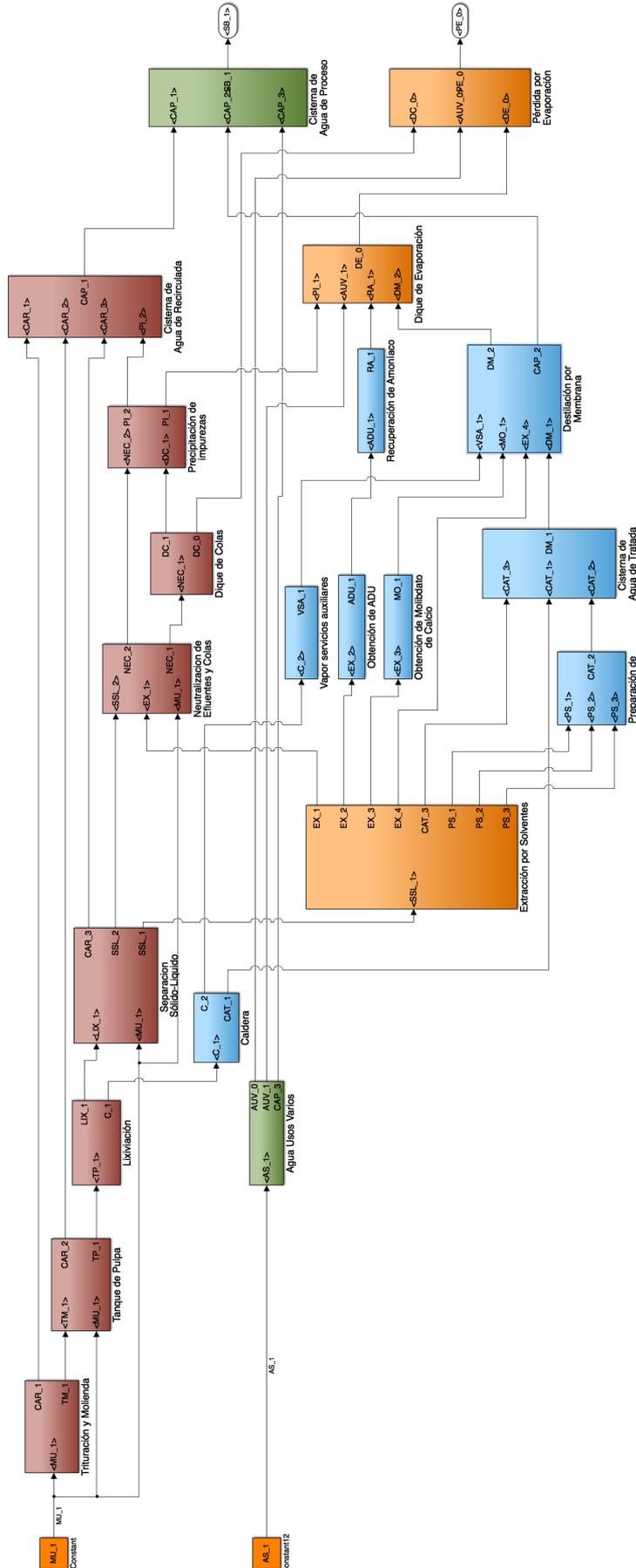


Figura 3.13. Nuevo Modelo del Balance de Agua en Simulink®. Fuente: (Propia)

Dependiendo del proceso en particular estos factores pueden estar relacionados con: la capacidad de procesamiento del mineral [MU-1], la relación de caudales que ingresan o egresan de dicho proceso, factores del tipo operativos como %p/p de sólidos en las pulpas o factores de recuperación, y finalmente, parámetros estimados bajo algún criterio, donde no hay datos al respecto. El principal objetivo buscado con esta metodología, es poder estudiar las variables en un rango de trabajo sin cometer errores importantes por tener caudales de corrientes intermedias fijas, estimados en función de una capacidad de procesamiento fija. En la Tabla 3.9 se presenta la lista de estos factores, su valor y fórmula de cálculo en los casos que se los estimó sobre esa base.

Tabla 3.9. Factores utilizados en el modelo. Fuente: (Propia)

Factores	Valor	Fórmula	Observaciones
Relación entre corrientes			
f_C	2/3	[C-2] / [C-1]	Generación de vapor en la caldera
f_{LIX}^{dil}	0,1154	[C-1] / [TP-1]	Ingreso de vapor a lixiviación
f_{SSL}^{dil}	2,28	[SSL-1] / [LIX-1]	Dilución del lixiviado a la salida de SSL
f_{SX}^{U}	0,0272	[PS-1] / [SSL-1]	Entrada de solución para reextracción de U
f_{SX}^{Mo}	0,0272	[PS-2] / [SSL-1]	Entrada de solución para reextracción de Mo
f_{SX}^{reg}	0,0272	[PS-3] / [SSL-1]	Entrada de solución para regeneración del solvente
f_{SX}^{scrub}	0,0091	[CAT-3] / [SSL-1]	Entrada de solución para lavado del solvente
Factores operativos			
f_{TM}	0,70		%p/p sólidos en pulpa en [TM-1]
f_{TP}	0,50		%p/p sólidos en pulpa en [TP-1]
f_{SSL}^{pulp}	0,625		%p/p sólidos en pulpa en [SSL-2]
f_{NEC}^{pulp}	0,50		%p/p sólidos en pulpa en [NEC-1]
f_{MD}	0,70		Recuperación de agua en el proceso MD
Factores estimados			
f_{SX}	0,95		Pérdida de agua por arrastre en el solvente
f_{NEC}^{sol}	0,05		Incremento de sólidos por precipitación en [NEC-1]
f_{PI}	0,15		Pérdida de agua con los precipitados en [PI-1]
f_{AUV}^{used}	0,10	[CAP-3] / [AS-1]	Usos varios del agua en relación a la extracción máx
f_{AUV}^{dust}	0,50	[AUV-0] / [CAP-3]	Perdida por evaporación en control de polvo

En el nuevo modelo, por ende, los cálculos han cambiado su forma por lo que los bloques del modelo no necesariamente son el mismo cálculo que en el modelo desarrollado para el sistema original. No obstante, sí representan el balance de masa en cada una de los bloques del diagrama de flujo modificado. En la Figura 3.14 se presenta el balance en el *Separador Sólido-Líquido*, donde se puede observar como intervienen estos factores en el cálculo de las corrientes [SSL-1], [SSL-2] y [CAR-3] (Ecuación 3.11, Ecuación 3.12 y Ecuación 3.13). La corriente [MU-1] representa el caudal de mineral procesado, que para el balance original era de 26t/h.

$$m_{SSL-2}^{H_2O} = m_{MU-1}^{Mineral} * \frac{(1 - f_{SSL}^{pulp})}{f_{SSL}^{pulp}} \tag{3.11}$$

$$m_{SSL-1}^{H_2O} = m_{LIX-1}^{H_2O} * \frac{(1 - f_{SSL}^{dil})}{f_{SSL}^{dil}} \tag{3.12}$$

$$m_{CAR-3}^{H_2O} = \left(m_{SSL-1}^{H_2O} + m_{SSL-2}^{H_2O} \right) - \left(m_{LIX-1}^{H_2O} \right) \tag{3.13}$$

En la Figura 3.15 se presenta el balance para el proceso de *Extracción por Solventes*, donde se puede observar la división de las corrientes para este modelo, donde cada entrada está asociada a una salida en particular. Además se puede observar como afectan los factores de la

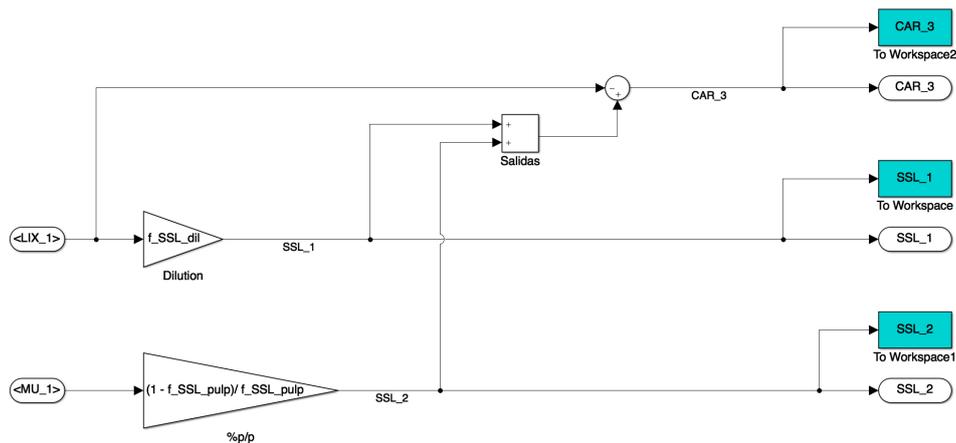


Figura 3.14. Balance de Agua para el Separador Sólido-Líquido en el nuevo modelo. Fuente: (Propia)

Tabla 3.9 a cada corriente. En especial para el balance de las pérdidas por arrastre del solvente, las cuales finalmente van a salir del proceso con [EX-4] cuando se realice la regeneración o re-acondicionado del solvente. Se puede observar que todas las corrientes están relacionadas con la corriente de entrada [SSL-1].

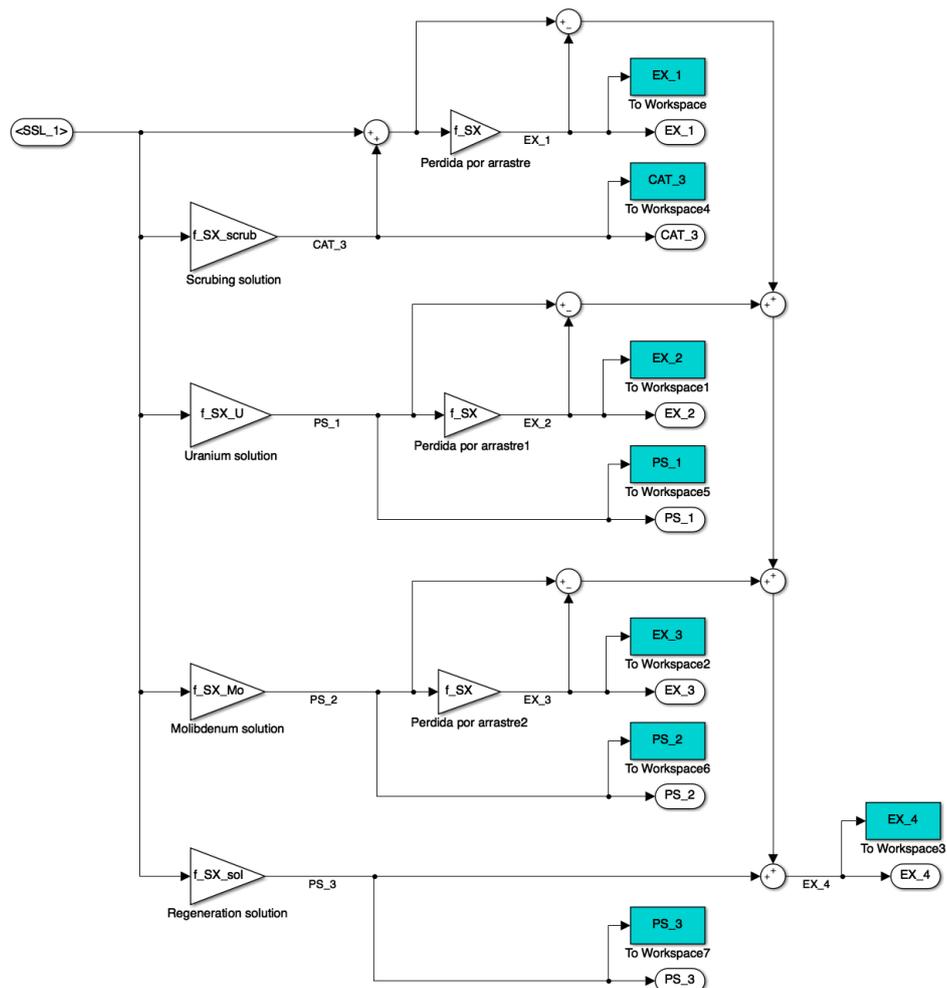


Figura 3.15. Balance de Agua en la etapa de Extracción por Solventes en el nuevo modelo. Fuente: (Propia)

Otro de los balances que ha cambiado de forma considerable para este nuevo modelo es el del *Dique de Evaporación*. El principal cambio a destacar es que en este modelo se calcula el área requerida para evaporar un cierto volumen de agua anualmente, a diferencia del anterior, que el área de evaporación para este dique está prefijada por el diseño (Figura 3.16). Para el caso del *Dique de Colas* se conserva el mismo tipo de balance del primer modelo, debido a que el área de este embalse está calculada en función de la cantidad de mineral que se va a procesar anualmente.

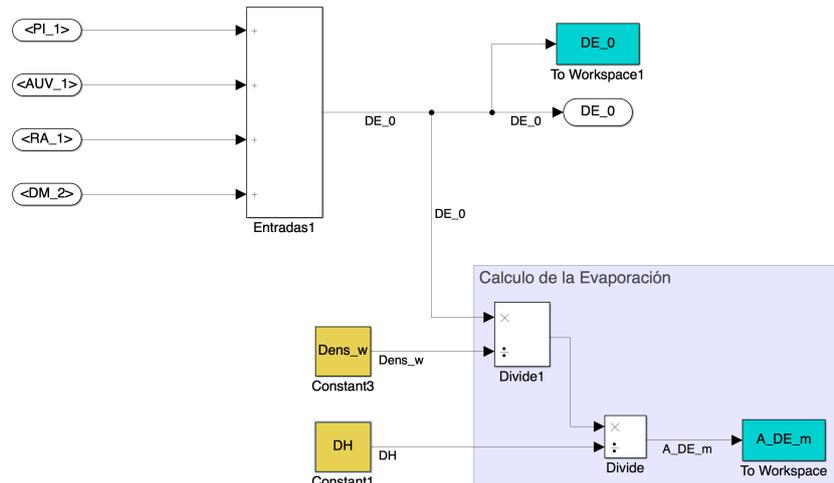


Figura 3.16. Balance de Agua para el Dique de Evaporación. Fuente: (Propia)

Finalmente, cabe mencionar el balance en la nueva etapa de *Destilación por Membranas*. En este se considera como entradas a las corrientes que se reciclan ([VAS-1], [MO-1] y [EX-4]), y al aporte del agua de proceso que viene de la *Cisterna de Agua de Procesos* ([CAP-2]). Las salidas son dos nuevas corrientes: el permeado [DM-1] y el rechazo [DM-2]. Estas corrientes están además relacionadas entre sí por el factor de recuperación (f_{MD}) que es un factor propio a la operación y rendimiento del proceso. En la Figura 3.17 se presenta el balance para esta etapa en forma gráfica y en las Ecuación 3.14 y Ecuación 3.15 en forma matemática.

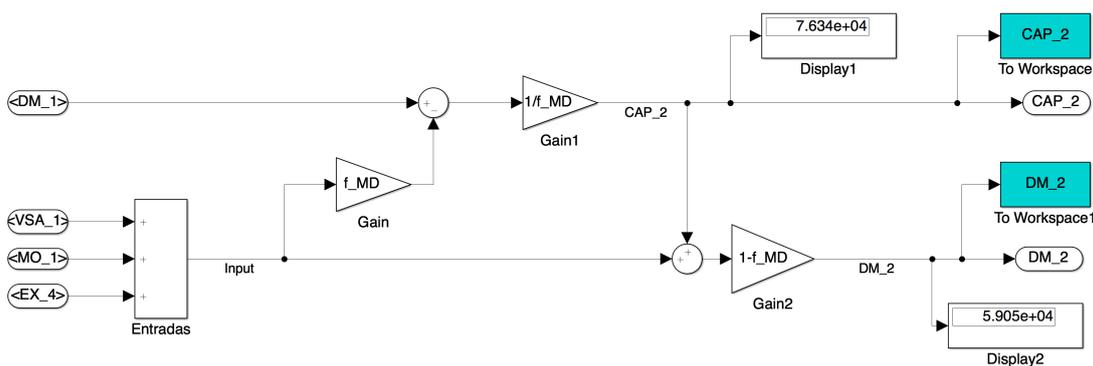


Figura 3.17. Balance de Agua para el proceso de Destilación por Membranas. Fuente: (Propia)

$$m_{CAP-2}^{H_2O} = \frac{m_{DM-1}^{H_2O} - \left(\left(m_{VSA-1}^{H_2O} + m_{MO-1}^{H_2O} + m_{EX-4}^{H_2O} \right) * f_{MD} \right)}{f_{MD}} \quad (3.14)$$

$$m_{DM-2}^{H_2O} = \left(m_{CAP-2}^{H_2O} + \left(m_{VSA-1}^{H_2O} + m_{MO-1}^{H_2O} + m_{EX-4}^{H_2O} \right) \right) * \left(1 - f_{MD} \right) \quad (3.15)$$

Como adicional al modelo, con el fin de evaluar distintas opciones para el balance de agua de la instalación, se ha modificado este nuevo modelo en algunas de las simulaciones que se estudiarán en el próximo apartado, eliminando la etapa de *Destilación por Membranas*. Para esta opción, a nivel de la simulación, se considera que la corriente de entrada de agua de proceso se iguala a la corriente que alimenta a la *Cisterna de Agua Tratada* ([CAP-2] = [MD-1]), y que las corrientes recirculadas se envían directamente al *Dique de Evaporación* a través de la corriente [MD-2] como se representa en la Figura 3.18.

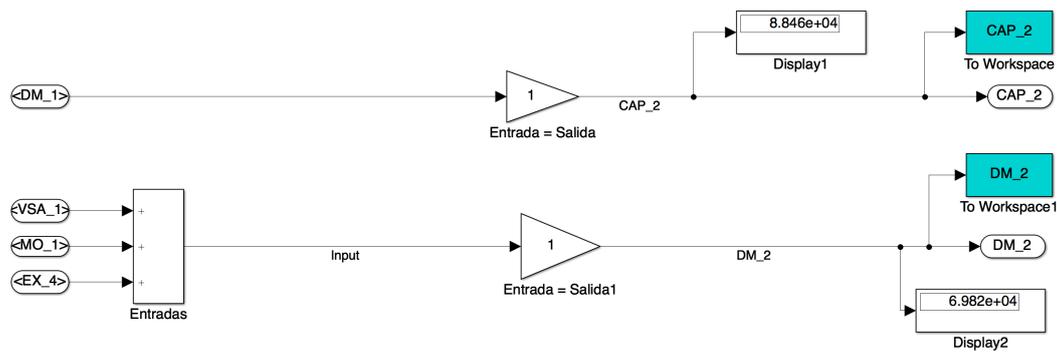


Figura 3.18. Balance de Agua sin el proceso de Destilación por Membranas. Fuente: (Propia)

En el Apéndice 4 se presentan los demás bloques del modelo y el script para ejecutar la simulación.

3.4.2. Estudio de sensibilidad del Nuevo Balance de Agua

Con este nuevo modelo que se ha obtenido es posible realizar un estudio de sensibilidad sobre las principales variables que intervienen en el proceso, teniendo en cuenta los objetivos que se busca: Extracción máxima de agua igual a 30 m³/h (≈ 262.000 m³/año) y una capacidad para procesar 26t/h (≈ 227.000 t/año).

Teniendo en cuenta estos objetivos, el mayor desafío que presenta el Balance de Agua original es el de requerir extraer mayor cantidad de agua del acuífero del que este es capaz de suministrar en forma sustentable. Para satisfacer este requisito, existen tres posibilidades: aumentar la recirculación del agua, reducir la capacidad de procesamiento del mineral o reducir el consumo en alguno de sus procesos.

A continuación se estudian dos casos, el primero tiene el objetivo de estudiar el sistema con el proceso de recuperación de agua por Destilación por Membranas, y en el segundo se plantea la hipótesis de no agregar el proceso de Destilación por Membrana evaluando las alternativas existentes para el proyecto. Para poder evaluar y comparar los resultados de los diferentes casos se definieron tres parámetros:

- **Relación de Extracción:** Se define como la relación entre los requerimientos de extracción del *Sistema de Bombeo* de la instalación y la capacidad máxima de extracción del acuífero (Ecuación 3.16). Representa el principal parámetro a evaluar, ya que su valor unitario es el objetivo mínimo buscado en esta evaluación.

$$r_{\text{extracción}} = \frac{\left(m_{SB-1}^{H_2O}\right)}{\left(m_{AS-1}^{H_2O}\right)} \quad (3.16)$$

- **Relación de Recirculación:** Se define como la relación entre las corrientes que se recirculan en el proceso y el consumo bruto de la instalación (Ecuación 3.17). Su importancia radica en conocer el porcentaje de recirculación al cual podrá operar la instalación, y la disponibilidad de agua con capacidad de ser recirculada que le queda al sistema.

$$r_{\text{recirculación}} = \frac{\left(m_{PI-1}^{H_2O} + m_{EX-4}^{H_2O} + m_{MO-1}^{H_2O} + m_{VSA-1}^{H_2O} \right)}{\left(m_{CAP-3}^{H_2O} + m_{CAR-1}^{H_2O} + m_{CAR-2}^{H_2O} + m_{CAR-3}^{H_2O} + m_{DM-1}^{H_2O} + m_{DM-2}^{H_2O} \right)} \quad (3.17)$$

- **Relación de Evaporación:** Se define como la relación entre las pérdidas totales por evaporación y el consumo bruto de la instalación (Ecuación 3.18). Cuantifica las pérdidas del sistema, y su variación esta relacionada con el área que requerirá el *Dique de Evaporación*.

$$r_{\text{evaporación}} = \frac{\left(m_{PE-0}^{H_2O} \right)}{\left(m_{CAP-3}^{H_2O} + m_{CAR-1}^{H_2O} + m_{CAR-2}^{H_2O} + m_{CAR-3}^{H_2O} + m_{DM-1}^{H_2O} + m_{DM-2}^{H_2O} \right)} \quad (3.18)$$

Las condiciones iniciales de los factores para todos los casos estudiados son las presentadas en la Tabla 3.9. Los restantes parámetros requeridos por el modelo son los presentados en la Tabla 3.10 junto a sus valores iniciales.

Tabla 3.10. Condiciones iniciales para la simulación del modelo. Fuente: (Propia)

Parámetro	Id	Valor
Capacidad de extracción máxima	[AS-1]	262.800 t/año
Capacidad de procesamiento del mineral	[MU-1]	227.760 t/año
Área del Dique de Colas del mineral	[A-DC]	120.000 m ²
Déficit Hídrico	[DH]	0,589 m/año
Densidad del agua	[Dens-w]	1000 Kg/m ³

CASO A: Balance de Agua con recuperación de agua por Destilación con Membranas

Según los resultados obtenidos para el Balance del Agua del sistema original, la recirculación alcanza al 60 % (Figura 3.11) del consumo bruto. Con el fin de aumentar este valor, se propuso en el nuevo Balance de Agua el agregado de un proceso de Destilación por Membranas capaz de recuperar una parte adicional del agua utilizada en el proceso, agua que además presenta una calidad elevada. Siguiendo en línea con este análisis, uno de los principales valores que se desea conocer es cuanto es capaz de recuperar este proceso, o dicho de otro modo, cuanto hay que exigirle al proceso que recupere de agua para cumplir con los objetivos buscados. Este valor va a estar dado por el factor de recuperación de agua (f_{MD}) que se incluyó en el modelo.

En la Figura 3.19 se presenta los resultados para la simulación del Balance de Agua con una variación en el factor de recuperación en un rango de 0,50 a 0,90 ($f_{MD} = [0,5 - 0,9]$). Se puede observar que la $r_{\text{extracción}}$ varía en forma inversa al aumento del factor de recuperación, y que el valor de la unidad lo alcanza para un de $f_{MD} = 0,63$, es decir, cuando los requerimientos de extracción del sistema son iguales a la máxima capacidad de extracción del acuífero. Se observa también que la recirculación supera el 70 % ($r_{\text{recirculación}} > 0,70$) y la evaporación esta cercana al 25 % ($r_{\text{evaporación}} \approx 0,25$).

Podemos decir que el valor de este parámetro está dentro del rango de operación normal para los procesos de Destilación por Membranas a escala industrial, el cual por lo general se lo restringe a 0,80 para evitar la formación de precipitados cristalinos de sales que podrían

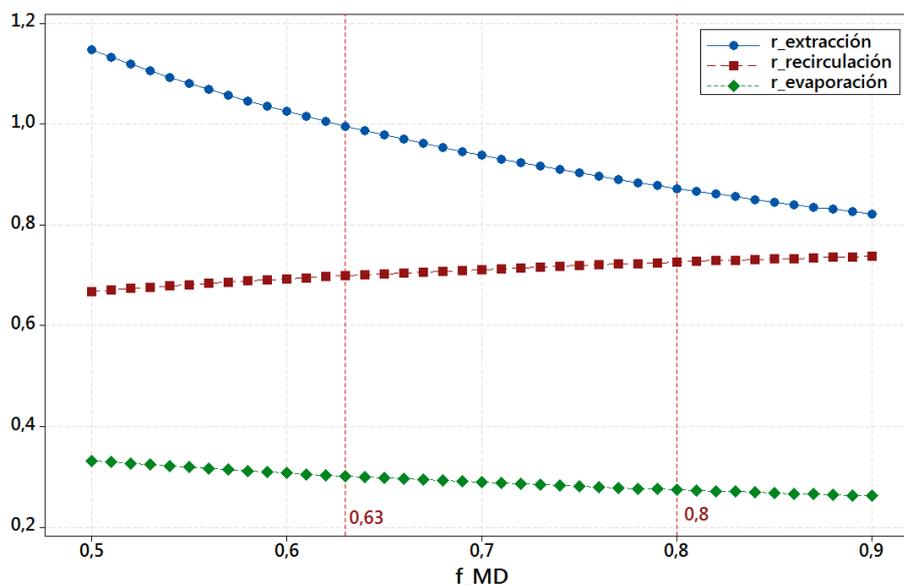


Figura 3.19. Resultados del modelo para la variación del f_{MD} . Fuente: (Propia)

ser perjudiciales para el equipo. Ambos valores son los que se representan en la Figura 3.19 constituyendo los mínimos y máximos de operación para este parámetro. También se puede observar en la gráfica que la $r_{recirculación}$ aumenta de forma mas lenta a medida que aumenta el f_{MD} . Por el contrario la $r_{evaporación}$ disminuye a medida que aumenta la recuperación del agua, y lo hace también de forma lenta.

Teniendo en cuenta que con un factor de recuperación de 0,80 ($f_{MD} = 0,80$) obtenemos una $r_{extracción} = 0,872$, podemos pensar en variar la capacidad de procesamiento del mineral [MU-1] hasta alcanzar una $r_{extracción} = 1$, lo que nos daría un aumento en la producción de uranio de la planta. En la Figura 3.20 se presenta la variación de los tres parámetros en función de la capacidad de procesamiento del mineral [MU-1] para un $f_{MD} = 0,80$. Podemos observar que en estas condiciones es posible aumentar la capacidad de producción en un 25% (284.700 t/año), un valor para nada despreciable a la hora de evaluar económicamente la instalación de un proceso de Destilación por Membranas. La recirculación llegaría al 75% ($r_{extracción} \approx 0,75$) y la evaporación se acercaría al 25% ($r_{extracción} \approx 0,25$), ambos valores con poca variación.

En el Apéndice 4 se presentan los datos completos obtenidos de la simulación del modelo para la variación del factor de recuperación, así como también el Balance de Agua completo para la instalación con el nuevo modelo para un factor de recuperación $f_{MD} = 0,63$ y $f_{MD} = 0,80$. Se presentan también los datos correspondientes al análisis de la variación en la capacidad de procesamiento [MU-1] junto al resultado para el Balance de Agua completo para el caso $f_{MD} = 0,80$ y [MU-1] = 284.700 t/año.

CASO B: Balance de Agua sin proceso de recuperación de agua

En miras de evaluar distintas posibilidades para la futura instalación, no instalar un procesos de recuperación de agua es una de ella. Por lo que en este apartado se estudian esta posibilidad pero teniendo en cuenta la nueva distribución del agua en la planta, es decir, considerando el nuevo diagrama de bloques (Figura 3.12) sin la etapa de tratamiento por *Destilación por Membranas*. Considerando que las mejoras propuestas para la gestión del agua

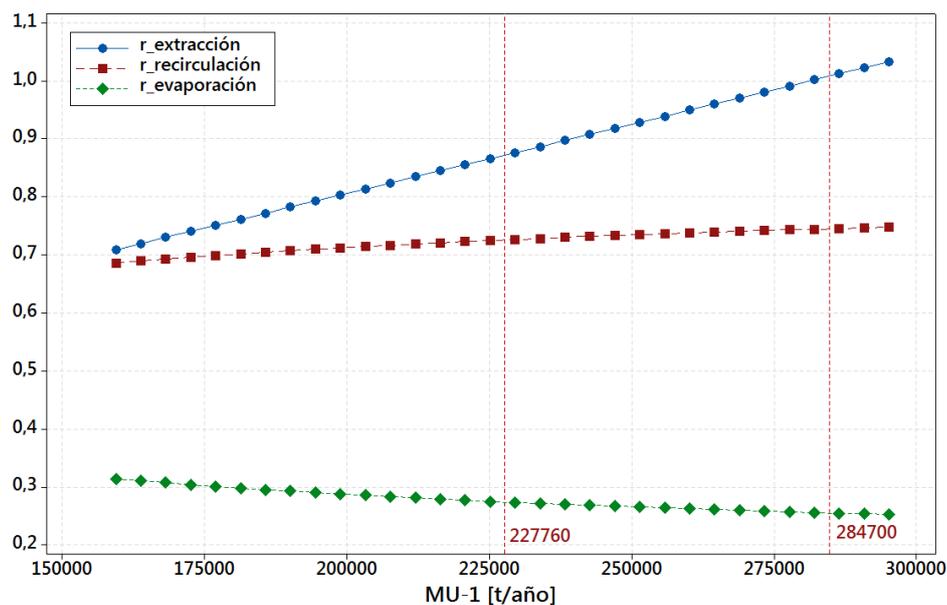


Figura 3.20. Resultados del modelo para la variación de [MU-1] con $f_{MD} = 0,80$. Fuente: (Propia)

en la instalación no implica muchos cambios, pero si mejoras del proceso no solo desde el punto de vista técnico, sino también de seguridad y ambiente. Como se mencionó en la sección anterior, para estudiar este caso el modelo sufre una pequeña modificación en las corrientes pertenecientes a la etapa de *Destilación por Membranas* según se indica en la Figura 3.18. Cabe mencionar aquí, que igualmente un proceso de tratamiento (Planta Desmineralizadora) tendrá que ser necesario como mínimo para tratar el agua que ingresa a la caldera, debido a que la calidad del Agua de Proceso, agua subterránea, no es la adecuada para el ingreso a la caldera. A este nivel de desarrollo, se considera a este tratamiento como una etapa donde la entrada es igual a la salida, por lo que no se consideran pérdidas de agua en él.

El problema que surge al eliminar el proceso de recuperación de agua es que la recirculación baja, y por ende aumenta la extracción. Con lo que al igual que para el caso original del Balance de Agua el requerimiento de extracción es mayor que la extracción máxima permitida $r_{\text{extracción}} = 1,08$, aunque menor que para el caso original (Ecuación 3.7). Esto corrobora, que la nueva gestión del agua aunque no posea un proceso de recuperación, mejora por sí sola el consumo de agua de la instalación. Lo primero que podemos pensar entonces es en reducir la capacidad de procesamiento del mineral para reducir el consumo de agua y así bajar la $r_{\text{extracción}}$. En la Figura 3.21 se presentan los tres parámetros estudiados en función de la capacidad de procesamiento del mineral para una instalación sin proceso de recuperación de agua adicional. Como resultado de esta evaluación obtenemos que para que el proceso cumple con los requerimientos de extracción máxima de agua para el acuífero ($r_{\text{extracción}} = 1,00$) se requiere reducir un 10% la capacidad de procesamiento de mineral (204.984 t/año) alcanzando un recirculación cercana al 65% ($r_{\text{recirculación}} \approx 0,65$) y una evaporación del 30% ($r_{\text{evaporación}} \approx 0,30$).

Finalmente, el último análisis que podemos hacer es el de estudiar reducir el consumo de agua optimizando algún proceso en particular. Según el análisis realizado de los resultados del Balance de Agua para el caso original (Subsección 3.2.4) el proceso más demandante de agua es la etapa de *Separación Sólido-Líquido*, donde los minerales agotados son lavado en una serie de decantadores en contra corriente. En este proceso el lixiviado es diluido 2,28 veces, lo que

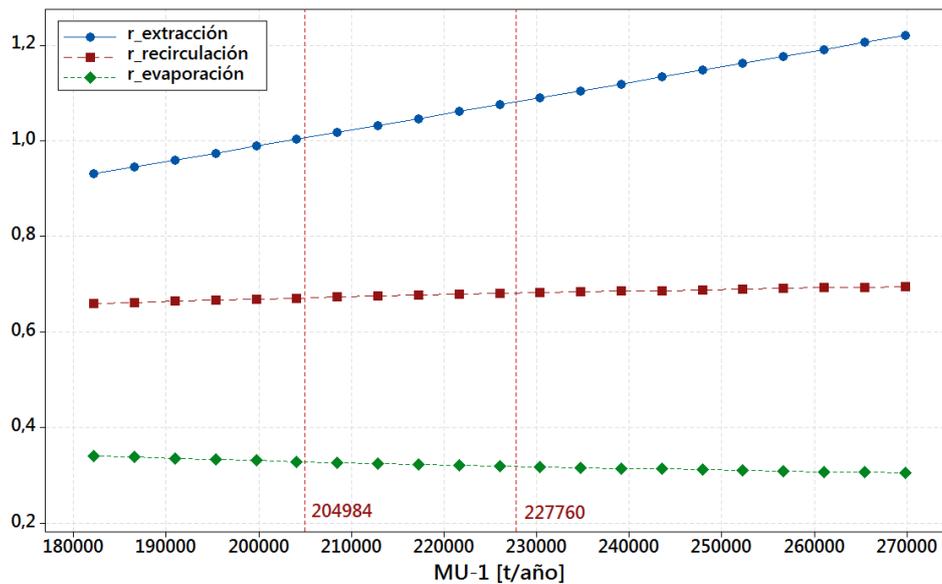


Figura 3.21. Resultados del modelo sin MD para la variación de [MU-1]. Fuente: (Propia)

representa una gran demanda de agua que debe ser estudiada para mejorar la eficiencia en el consumo de agua en este proceso. Si bien es necesario un estudio técnico de optimización, podemos a este nivel variar este factor de dilución (f_{SSL}^{dil}) para obtener un valor por debajo del cual la operación puede ser viable, y orientar a los estudios técnicos hacia donde apuntar. En la Figura 3.22 se presenta el resultado de este análisis, donde se puede observar que con una variación del 15% en el valor de este factor de dilución ($f_{SSL}^{dil} = 1,94$) el proceso alcanzaría un valor aceptable de extracción de agua ($r_{extracción} \approx 1,00$) con muy poca variación en las relaciones de recirculación y de evaporación para el sistema.

En el Apéndice 4 se presentan los datos obtenidos para las dos simulaciones, y el resultado de los Balances de Agua con el modelo modificado sin proceso de recuperación de agua para los tres casos: el sistema en condiciones iniciales, con la reducción del 10% de la capacidad de procesamiento del mineral, y finalmente, con la reducción del 15% de la dilución en la etapa de *Separación Sólido-Líquido*.

3.4.3. Propuesta final de mejora para el Balance de Agua del CMFCS

En base a los estudios realizados sobre el modelo y la revisión bibliográfica de los temas involucrados en este apartado se presenta la propuesta final para la operación de la instalación.

En primer lugar se propone realizar las modificaciones necesarias para adecuar la gestión del agua en la instalación al nuevo Diagrama de Bloques (Figura 3.12), ya que aunque no se agregue una etapa de recuperación de agua, el sistema intrínsecamente mejora el consumo de la instalación, evitando y disminuyendo las pérdidas por evaporación. La $r_{extracción}$ disminuye de 1,24 a 1,08, la $r_{recirculación}$ aumenta de 0,60 a 0,68 y la $r_{evaporación}$ también disminuye de 0,40 a 0,31. Además el área del dique de evaporación [A-DE] se puede reducir cerca del 24% (ver Apéndice 4).

Más allá de esta mejora general, el valor de los requerimientos de extracción aún están casi un 10% por arriba del máximo permitido por el acuífero, por lo que hay que evaluar

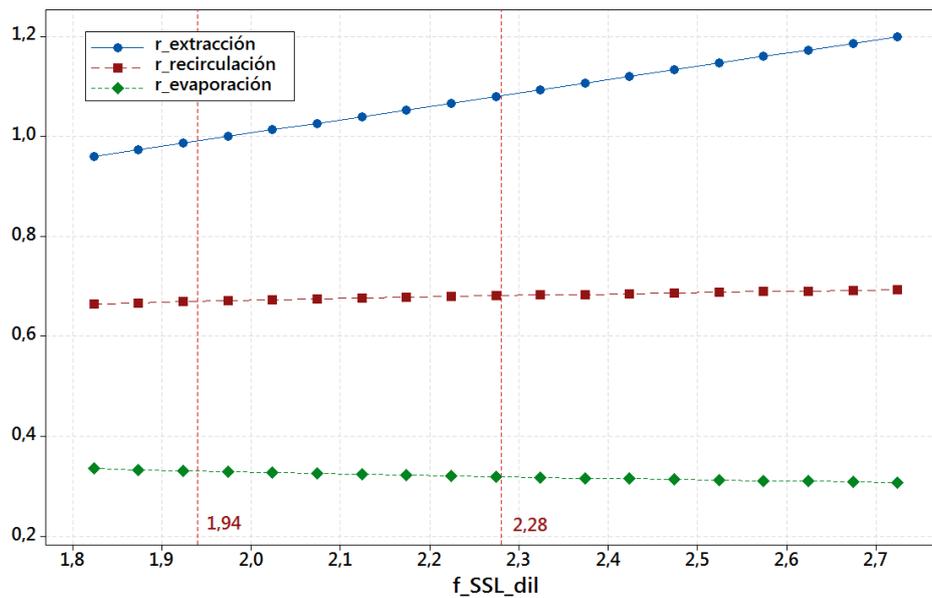


Figura 3.22. Resultados del modelo sin MD para la variación del factor de dilución $x f_{SSL}^{dil}$. Fuente: (Propia)

alguna alternativa más. Con el fin de no modificar la capacidad de procesamiento de mineral [MU-1] para no afectar a la capacidad de producción de concentrados de uranio, se propone la adición de una etapa de recuperación de agua por tratamiento con un proceso de Destilación por Membranas, tal como se indica en el nuevo diagrama de bloques (Figura 3.12) para la instalación. Este proceso tiene la capacidad de recuperar hasta un 80 % del agua que se procesa, obteniendo un permeado de muy alta calidad (apto para ser usa en una caldera) y un rechazo concentrado en sales que es enviado directamente al dique de evaporación.

Con la finalidad de garantizar una correcta operación de este tratamiento se le va a exigir que pueda trabajar con un factor de recuperación del 70 % ($f_{MD} = 0,70$). Con este valor se busca no solo cumplir con los requerimientos de extracción de agua del acuífero y evitar problemas operativos a futuro, sino también, asegurar un margen de seguridad ante posibles consumos de agua que no se han tenido en cuenta o que han sido estimados de forma incorrecta. Además, llegado el momento de operación real de la planta existe la posibilidad de aumentar la capacidad de procesamiento del mineral, entre un 10 % y 20 %, exigiendo un poco más de recuperación a este proceso de recuperación.

Finalmente, en la Tabla 3.12 se presenta el Balance de Agua para la propuesta del sistema de gestión del agua de la instalación, y en la Tabla 3.11 se presentan los principales parámetros evaluados y su comparación con respecto al Balance de Agua original para el CMFCS.

Tabla 3.11. Comparación entre el Balance Agua propuesto y el caso original. Fuente: (Propia)

Parámetro	Propuesta	Original	Diferencia
[MU-1]	227.760 t/año	227.760 t/año	0,00 %
[SB-1]	246.402 t/año	325.872 t/año	24,39 %
Consumo de agua	1,082 m ³ /t	1,431 m ³ /t	24,39 %
$r_{extracción}$	0,938	1,240	24,39 %
$r_{recirculación}$	0,711	0,602	18,13 %
$r_{evaporación}$	0,289	0,398	27,44 %
[A-DE]	276.031 m ²	450.000 m ²	38,66 %

Tabla 3.12. Resultados del Nuevo Balance de Agua para el CMFCS - $f_{MD} = 0,70$. Fuente: (Propia)

Corrientes Id	Caudal Másico t/año
ADU-1	14.967
AS-1	262.800
AUV-0	13.140
AUV-1	13.140
C-1	26.284
C-2	17.522
CAP-1	161.536
CAP-2	58.586
CAP-3	26.280
CAR-1	97.611
CAR-2	130.149
CAR-3	461.832
CAT-1	43.806
CAT-2	47.264
CAT-3	5.271
DC-0	70.680
DC-1	168.468
DE-0	162.582
DM-1	96.341
DM-2	41.289
EX-1	555.266
EX-2	14.967
EX-3	14.967
EX-4	46.555
LIX-1	254.044
MO-1	14.967
NEC-1	239.148
NEC-2	452.774
PE-0	246.402
PI-1	93.186
PI-2	528.055
PS-1	15.755
PS-2	15.755
PS-3	15.755
RA-1	14.967
SB-1	246.402
SSL-1	579.219
SSL-2	136.656
TM-1	97.611
TP-1	227.760
VSA-1	17.522

4. Conclusión

En base a todo lo expuesto en este trabajo podemos destacar las siguientes conclusiones para el caso de estudio planteado:

- Analizando los estudios hidrogeológicos (Laboratorio de Hidrología, 2012) realizado en el lugar de emplazamiento de la futura instalación (Distrito Uranífero Pichiñan, Paso de Indios, Chubut, Argentina), se ha podido determinar que la única fuente posible de suministro de agua para la instalación deberá ser el acuífero confinado que se encuentra en la zona a una altura entre los 20 y los 150 metros de profundidad. Como resultado de diversos estudios realizados, tanto estáticos como dinámico, en dicho estudio se concluye que la máxima capacidad de extracción de agua del acuífero es de 30 m³/h ([AS-1] = 262.800 t/año), asegurando que a este ritmo de extracción de agua se estaría en condiciones seguras como para alcanzar un nuevo equilibrio dinámico del sistema hídrico subterráneo aún en condiciones muy adversas como la de suponer una recarga nula a largo plazo (20 años).
- En base al estudio de la memoria descriptiva para la Ingeniería Preliminar para el Complejo Minero Fabril Cerro Solo (López, 2015) se pudo determinar el balance de agua de la instalación y desarrolla el modelo de cálculo del mismo en el entorno Matlab®-Simulink®. El modelo fue resultado para una capacidad de procesamiento de mineral de 26 t/h ([MU-1] = 227.760 t/año), con el objetivo de determinar el consumo de la planta (1,431 m³/t) y el requerimiento de extracción de agua subterránea [SB-1] (325.872 t/año). Este modelo dio como resultado que el requerimiento de extracción de la planta superaba en un 24 % a la máxima capacidad de extracción establecida para el acuífero subterráneo, con una recirculación del 60 % y unas pérdidas por evaporación que rondaban el 40 %.
- En base a los resultado obtenido por este primer modelo, el sistema de gestión de agua de la instalación fue estudiado con mas detalles, con el fin de identificar los puntos de débiles y proponer las mejoras que no solo reduzcan el consumo neto de agua (o requerimiento de extracción) de la planta a los niveles permitidos, sino que también, mejoren la gestión del agua en la instalación con el fin de evitar problemas a futuro. Como resultado de este estudio un nuevo sistema de gestión del agua fue desarrollado y su balance de agua fue modelado. La principal característica que presenta este nuevo sistema es la de hacer una discriminación de las aguas en función de su calidad, dividiendo al proceso en tres sistemas con calidad de agua diferenciada: Agua Tratada, Agua de Proceso y Agua Recirculada. El objetivo de esta discriminación radica en no mezclar las agua que no lo necesiten con el fin de conservar una calidad moderada, no tener que realizar tratamientos costosos a grandes volúmenes de agua que no lo necesitan, y no distribuir contaminantes de forma innecesaria por toda la instalación mediante la recirculación de las aguas. Particularmente, este punto es importante teniendo en cuenta el caso de estudio, debido a que las aguas residuales de las instalaciones que tratan minerales de uranio pueden contener concentraciones de radionucleídos superiores a los límites normales con los que encontramos a estos elementos en la naturaleza. Otra de las propuestas mas destacadas de este nuevos sistema de gestión de las aguas de la planta, es la aplicación de un proceso de recuperación de agua por Destilación por Membranas tratando solamente las aguas que están dentro del sistema de Agua Tratada. Esta nueva

tecnología es capaz de cumplir con los requisitos exigidos para este proceso: alta calidad del agua recuperada (calidad para ingresar a calderas), altos porcentajes de recuperación ($\approx 80\%$) y altos porcentajes de rechazo de sales ($>99\%$).

- Se realizó un análisis de sensibilidad para el modelo del balance de agua del nuevo sistema de gestión de las aguas. Como resultado de este estudio se pudo concluir que el factor de recuperación mínimo que se le debe exigir al proceso de Destilación por Membranas es del 63% ($f_{MD} = 0,63$) para cumplir con la máxima capacidad de extracción [AS-1], trabajando a la capacidad de procesamiento de mineral [MU-1] establecida. No obstante, teniendo en cuenta que los procesos de Destilación por Membrana puede alcanzar valores de recuperación cercanos 80%, se evaluó la posibilidad de aumentar la capacidad de procesamiento del mineral [MU-1]. Como resultado de este análisis se puede decir que trabajando con un factor de recuperación $f_{MD} = 0,80$ en el proceso de Destilación por Membranas es posible aumentar la capacidad de procesamiento de mineral en un 25% (284.700 t/año) satisfaciendo el requerimiento de extracción máxima de agua. Resultado importante a la hora de la evaluación técnico-económica del proyecto.
- Se realizó un segundo análisis de sensibilidad, pero en este caso no se incluyó el proceso de recuperación de agua por Destilación por Membrana en el nuevo sistema de gestión de las aguas. Como resultado de este análisis se obtuvo que para cumplir con los requisitos de extracción máxima de agua del acuífero [AS-1], una posibilidad es reducir la capacidad de procesamiento de mineral [MU-1] en un 10%, u otra posibilidad es trabajar sobre el rendimiento de la etapa de Separación Sólido-Líquido para disminuir un 15% el factor de dilución que genera este proceso sobre el Lixiviado [LIX-1]. La primera de las opciones esta relacionado con la viabilidad económica del proyecto, y la segunda con la viabilidad técnica.
- A modo de cierre del trabajo, se realizó una propuesta para la operación de la instalación con el nuevo sistema de gestión de las aguas incluyendo el proceso de recuperación de agua por Destilación por Membrana. En esta propuesta, se le pide al proceso de Destilación por Membrana una recuperación del 70% ($f_{MD} = 0,70$) y se trabaja a la capacidad de procesamiento de mineral requerida (227.760 t/año). En estas condiciones se requiere una extracción de $\approx 246.000 \text{ m}^3/\text{año}$ de agua, con un consumo de $1,08 \text{ m}^3/\text{t}$, lo que representa una extracción de alrededor del 93% en relación a la máxima capacidad de extracción del acuífero, con una recirculación del 70% y una evaporación inferior al 30%. Con esta propuesta, basada en el nuevo sistema de gestión de las aguas dentro de la instalación (nuevo balance de agua) se logra reducir un 24,4% el consumo de agua y un 38,6% el área requerida por el dique de evaporación, con respecto al sistema original.

Como comentario final, podemos destacar la importancia de la recuperación del agua en los emprendimientos mineros, como parte de una análisis global de la gestión integral del agua en la instalación. La correcta gestión del agua, con balances de agua optimizados en función de su calidad y de los requerimientos reales de los procesos pueden reducir el consumo de agua. La optimización del uso del agua dentro de los procesos es otro de los factores importante, debido a que tiene la capacidad de reducir el consumo bruto de la instalación, lo que en procesos con recirculación, se traduce en reducción del consumo neto. Finalmente, hay entender a la recuperación del agua como un proceso para evitar pérdida por evaporación, debido a que en instalaciones como las de la minería de uranio, el agua normalmente no devuelve al medio en forma líquida, sino que se dispone en diques de evaporación donde finalmente se evapora y no se puede aprovechar para otros usos.

Referencias

- CNEA, 2005. *Comisión Nacional de Energía Atómica. Sitio web oficial* [online] [visitado 2016-07-01]. Disponible desde: <http://www.cnea.gov.ar/noticias-detalle?nid=2307>.
- COCHILCO, 2008. *Best Practices and Efficient use of Water in the Mining Industry*. Chile. ISBN 978-956-8242-10-7. Informe técnico. Chilean Copper Commission.
- DEPARTMENT OF WATER AFFAIRS AND FORESTRY, 2006. *Best Practice Guideline G2: Water and Salt Balances*. South Africa. ISBN 9780958513813. Informe técnico. Department of Water Affairs y Forestry.
- DEPARTMENT OF WATER AFFAIRS AND FORESTRY, 2007a. *Best Practice Guideline - H4: Water Treatment*. South Africa. ISBN 9780980267945. Informe técnico. Department of Water Affairs y Forestry.
- DEPARTMENT OF WATER AFFAIRS AND FORESTRY, 2007b. *Best Practice Guideline A3: Water Management in Hydrometallurgical Plants*. South Africa. ISBN 9780980267907. Informe técnico. Department of Water Affairs y Forestry.
- DUDENEY, A.W.L.; CHAN, B.K.C.; BOUZALAKOS, S. y HUISMAN, J.L., 2013. Management of waste and wastewater from mineral industry processes, especially leaching of sulphide resources: state of the art. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. Vol. 27, n.º 1, págs. 2-37. ISSN 1748-0930. Disponible desde DOI: 10.1080/17480930.2012.696790.
- FENG, D; ALDRICH, C. y TAN, H., 2000. Treatment of acid mine water by use of heavy metal precipitation and ion exchange. *Minerals Engineering*. Vol. 13, n.º 6, págs. 623-642. ISSN 08926875. Disponible desde DOI: 10.1016/S0892-6875(00)00045-5.
- GUNSON, A.J.; KLEIN, B.; VEIGA, M. y DUNBAR, S., 2012. Reducing mine water requirements. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 21, n.º 1, págs. 71-82. ISBN 0959-6526. ISSN 09596526. Disponible desde DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.08.020.
- HINTUKAINEN, Martti Samuel, 2015. *Maximizing of water recovery in nanofiltration of mine process waters by using antiscalants*. Tesis doctoral. Lappeenranta University of Technology.
- IAEA, 1993. *Uranium Extraction Technology*. International Atomic Energy Agency. IAEA-Technical Reports Series-359.
- IAEA, 2009. *Establishment of Uranium Mining and Processing Operations in the Context of Sustainable Development*. Vienna. ISBN 978-92-0-104409-9. Informe técnico. International Atomic Energy Agency.
- ICMM, 2012. *Water management in mining : a selection of case studies*. ISBN 978-0-9559983-7-9. Disponible desde DOI: 978-0-9559983-7-9. Informe técnico. International Council of Mining & Metals.
- IDRYSY, Houcyne El y CONNELLY, Richard, 2012. Water-the Other Resource a Mine Needs to Estimate. *Procedia Engineering*. Vol. 46, n.º 0, págs. 206-212. ISSN 18777058. Disponible desde DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.466.
- KENTISH, S. E. y STEVENS, G. W., 2001. Innovations in separations technology for the recycling and re-use of liquid waste streams. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 84, n.º 2, págs. 149-159. ISSN 13858947. Disponible desde DOI: 10.1016/S1385-8947(01)00199-1.

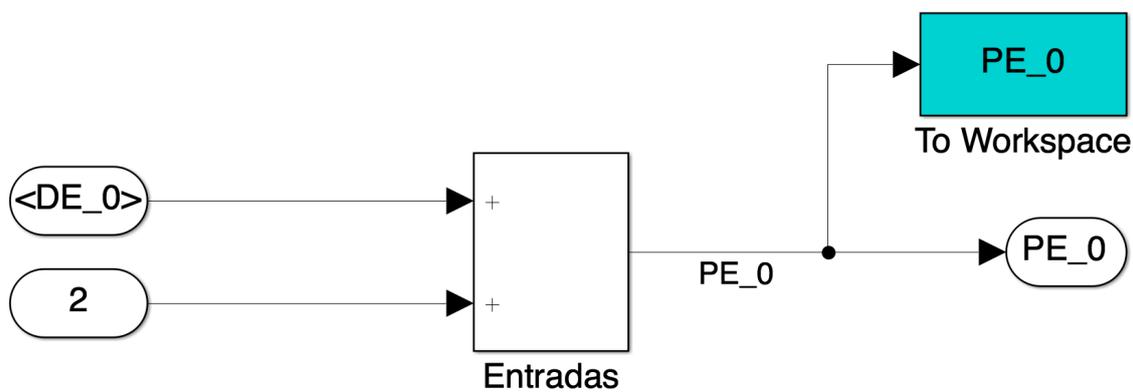
- KESIEME, Uchenna K; MILNE, Nicholas; CHENG, Chu Yong; ARAL, Hal y DUKE, Mikel, 2014. Recovery of water and acid from leach solutions using direct contact membrane distillation. *Water Science & Technology*. Vol. 69, n.º 4, págs. 868. ISBN 0273-1223 (Print)\r0273-1223 (Linking). ISSN 0273-1223. Disponible desde DOI: 10.2166/wst.2013.788.
- KIDD, StephenW, 2009. Nuclear Fuel Resources. En: *Nuclear Fuel Resources. Nuclear Engineering Handbook*. CRC Press, págs. 245-263. Mechanical Engineering Series. ISBN 978-1-4200-5390-6. Disponible desde DOI: 10.1201/9781420053913-c7.
- LABORATORIO DE HIDROLOGÍA, 2012. *Estudio Hidrogeológico del Distrito Uranífero Pichiñán Este, Paso de Indios, Provincia del Chubut - Informe Final*. Paso de Indios, Chubut. Informe técnico. FI-UNLP.
- LÓPEZ, Julian, 2015. *Ingeniería Preliminar de un Complejo Minero Fabril en Cerro Solo*. Buenos Aires, Argentina. Informe técnico. Comisión Nacional de Energía Atómica - GPMP - DTPU.
- LOTTERMOSER, Bernd, 2010. *Mine Wastes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-12418-1. Disponible desde DOI: 10.1007/978-3-642-12419-8.
- MATHWORKS, 2016. *Matlab - Simulink* [online] [visitado 2016-02-08]. Disponible desde: <http://es.mathworks.com/products/simulink/index.html>.
- MAUPIN, Molly A.; KENNY, Joan F.; HUTSON, Susan S.; LOVELACE, John K.; BARBER, Nancy L. y LINSEY, Kristen S., 2014. *Estimated use of water in the United States in 2010: U.S. Geological Survey Circular 1405*. ISBN 9781411338623. Disponible desde DOI: 10.3133/cir1405. Informe técnico.
- MERRITT, Robert C, 1971. *The extractive metallurgy of uranium*. [Golden]: Colorado School of Mines Research Institute.
- MILLER, James E., 2003. *Review of water resources and desalination techniques*. **urlalso:** <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2003/030800.pdf>. Informe técnico. Sandia National Laboratories.
- MILLERO, Frank J.; FEISTEL, Rainer; WRIGHT, Daniel G. y MCDUGALL, Trevor J., 2008. The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. Vol. 55, n.º 1, págs. 50-72. ISBN 0967-0637. ISSN 09670637. Disponible desde DOI: 10.1016/j.dsr.2007.10.001.
- NAYAR, Kishor G.; SHARQAWY, Mostafa H.; BANCHIK, Leonardo D. y LIENHARD V, John H., 2016. Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence. *Desalination*. Vol. 390, págs. 1-24. ISSN 00119164. Disponible desde DOI: 10.1016/j.desal.2016.02.024.
- OECD NEA, 2014. *Uranium 2014: Resources, Production and Demand*. OECD Publishing. ISBN 9789264223516. ISSN 00295507. Disponible desde DOI: 10.1787/uranium-2014-en. Informe técnico. OECD Nuclear Energy Agency.
- PÉREZ-GONZÁLEZ, A.; URTIAGA, A.M.; IBÁÑEZ, R. y ORTIZ, I., 2012. State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates. *Water Research*. Vol. 46, n.º 2, págs. 267-283. ISSN 00431354. Disponible desde DOI: 10.1016/j.watres.2011.10.046.
- SCHUMANN, R; LEVAY, G y AMETOV, I, 2009. The Impact of Recycling on Process Water Quality in Mineral Processing. En: *The Impact of Recycling on Process Water Quality in Mineral Processing. Water in Mining 2009*. Perth, Australia: The Australasian Institute of Mining y Metallurgy, págs. 79 -86.

- SIMATE, Geoffrey S. y NDLOVU, Sehliselo, 2014. Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. 2, n.º 3, págs. 1785-1803. ISBN 2213-3437. ISSN 22133437. Disponible desde DOI: 10.1016/j.jece.2014.07.021.
- STATISTICS CANADA, 2012. *Industrial Water Use*. Ottawa, Canada. **urlalso:** <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-401-x/16-401-x2012001-eng.pdf>. Informe técnico. Minister of Industry of Canada.
- WALTON, N.R.G., 1989. Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids—What is Their Precise Relationship? *Desalination*. Vol. 72, n.º 3, págs. 275-292. ISBN 00119164. ISSN 00119164. Disponible desde DOI: 10.1016/0011-9164(89)80012-8.
- WANG, Chen; HARBOTTLE, David; LIU, Qingxia y XU, Zhenghe, 2014. Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. *Minerals Engineering*. Vol. 58, págs. 113-131. ISBN 0892-6875. ISSN 08926875. Disponible desde DOI: 10.1016/j.mineng.2014.01.018.
- WNA, 2016. *World Nuclear Association*. Mining of Uranium [online] [visitado 2016-07-24]. Disponible desde: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium.aspx>.
- WOODS, Peter H, 2016. Uranium mining (open cut and underground) and milling. En: *Uranium mining (open cut and underground) and milling*. *Uranium for Nuclear Power*. Woodhead Publishing, págs. 125-156. ISBN 978-0-08-100307-7. Disponible desde DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100307-7.00006-5>.
- WWAP, 2015. *The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world*: UNESCO Publishing. World Water Assessment Programme. ISBN 9789231000713.

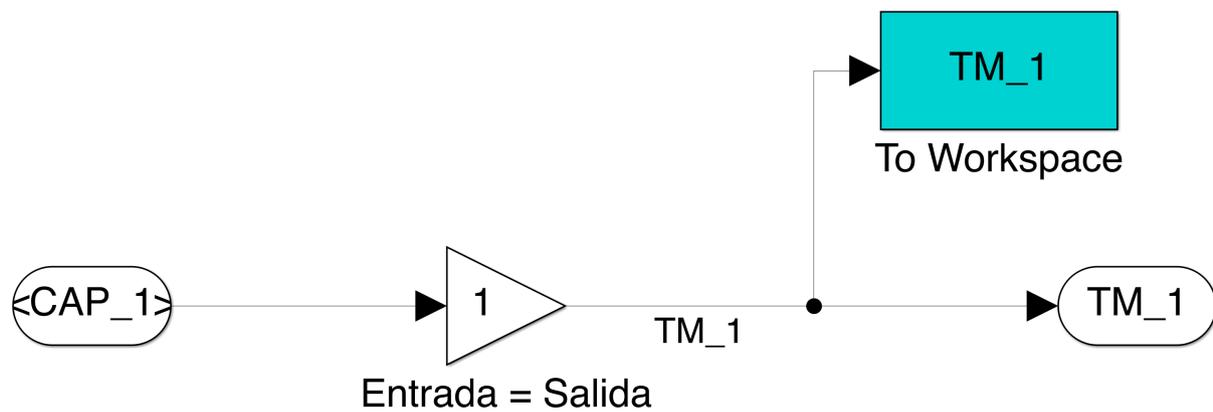
ANEXO A

.1. MODELO ORIGINAL - BALANCE DE AGUA PARA EL CMFCS

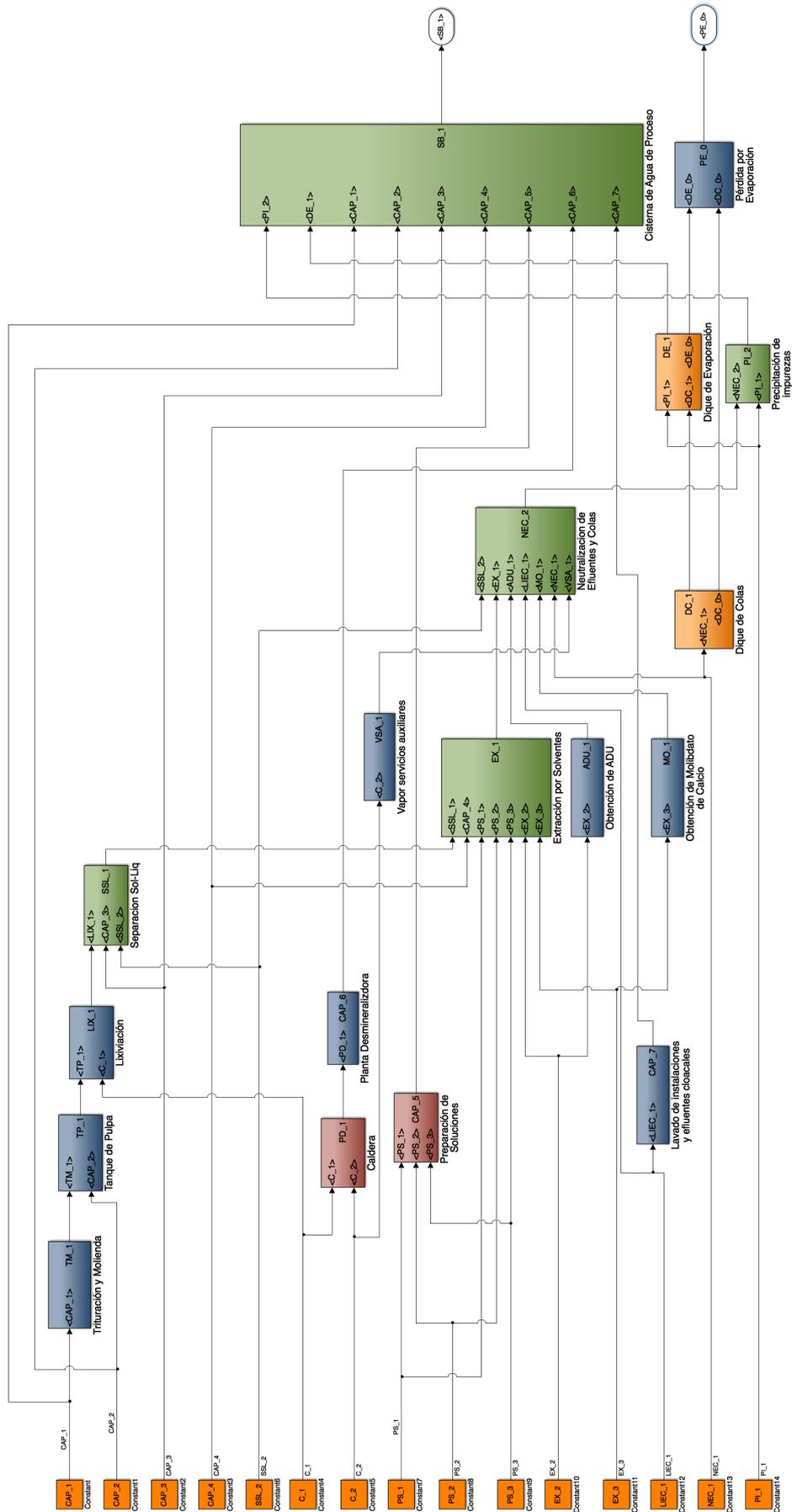
Modelo para Matlab®-Simulink®



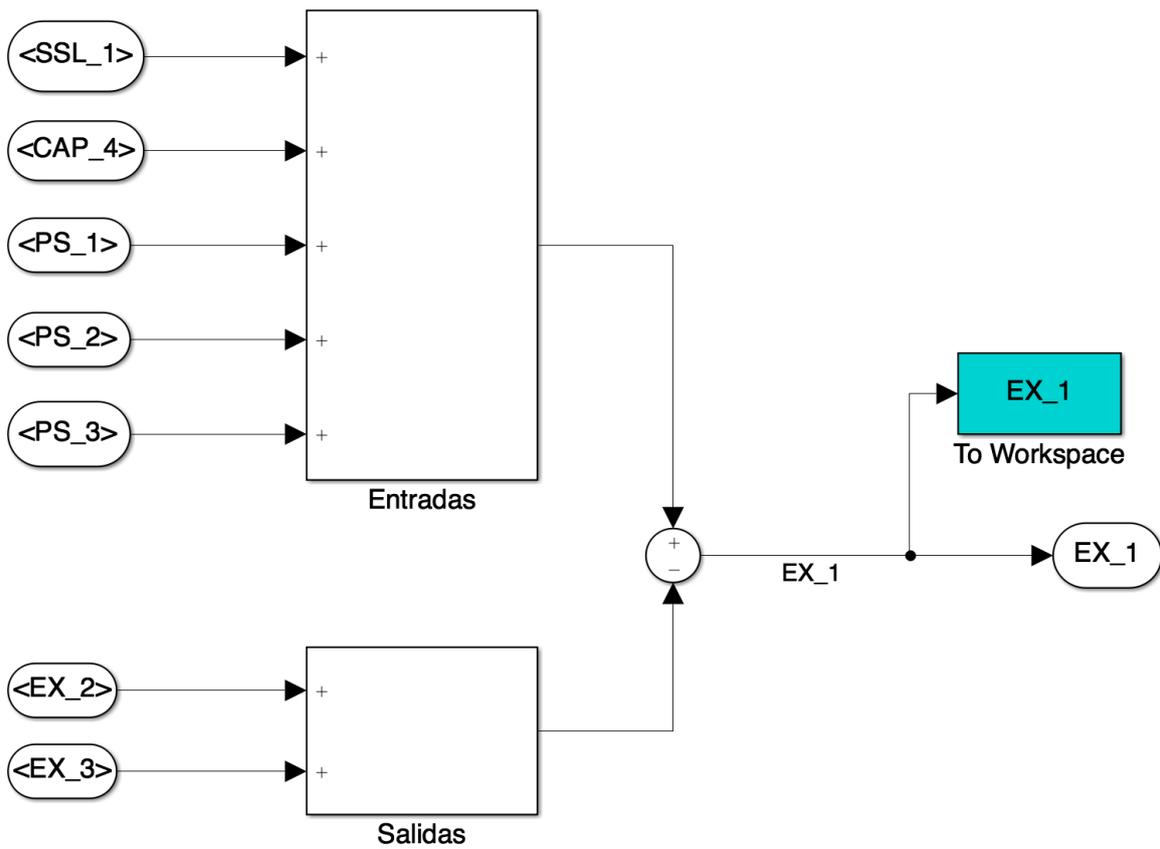
Modelo Original - Etapa: Pérdidas por Evaporación



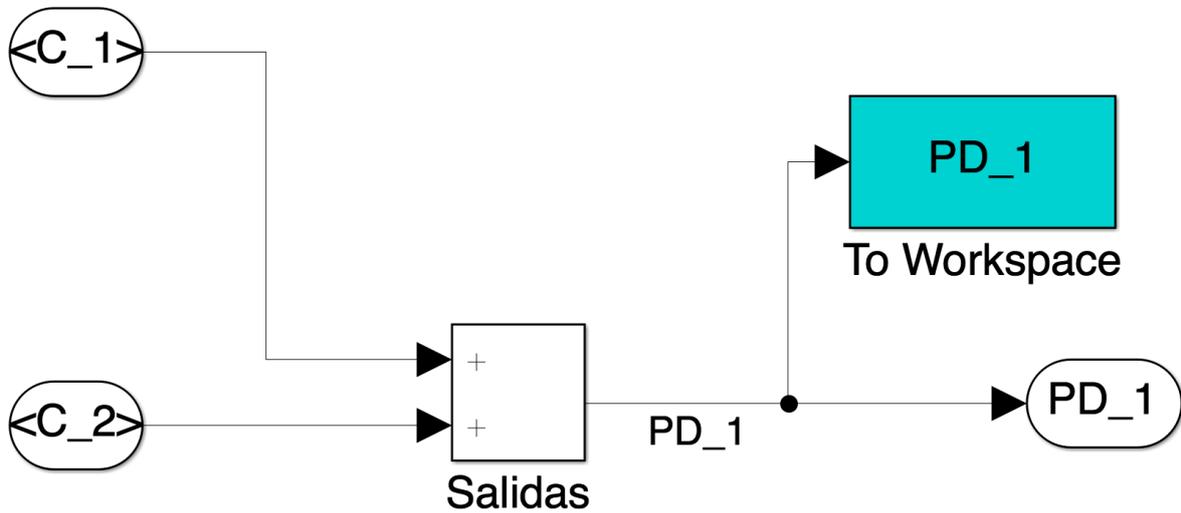
Modelo Original - Trituración y Molienda



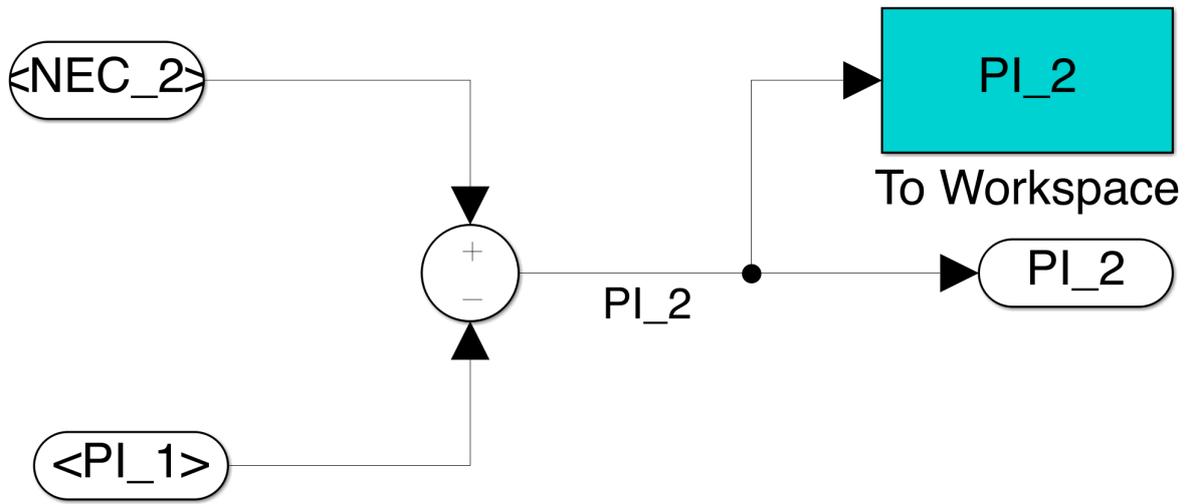
Modelo Original - Balance de Agua



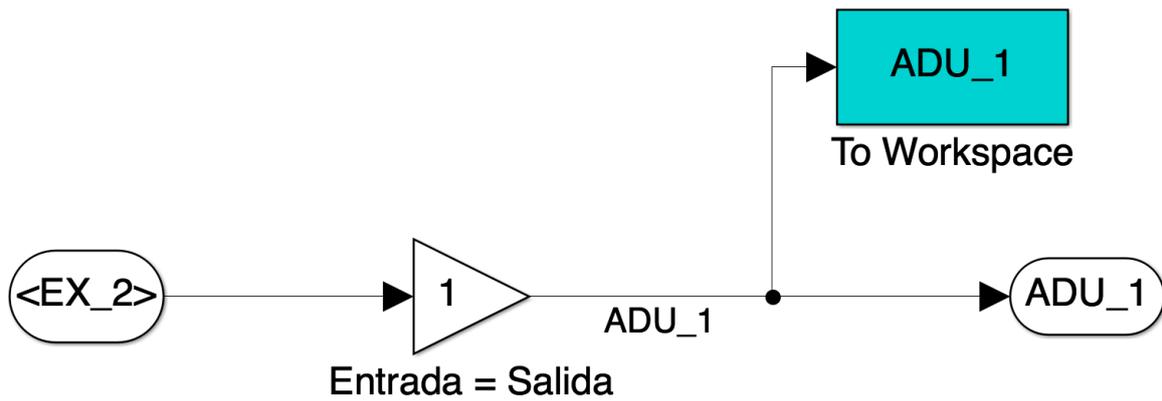
Modelo Original - Extracción por Solventes



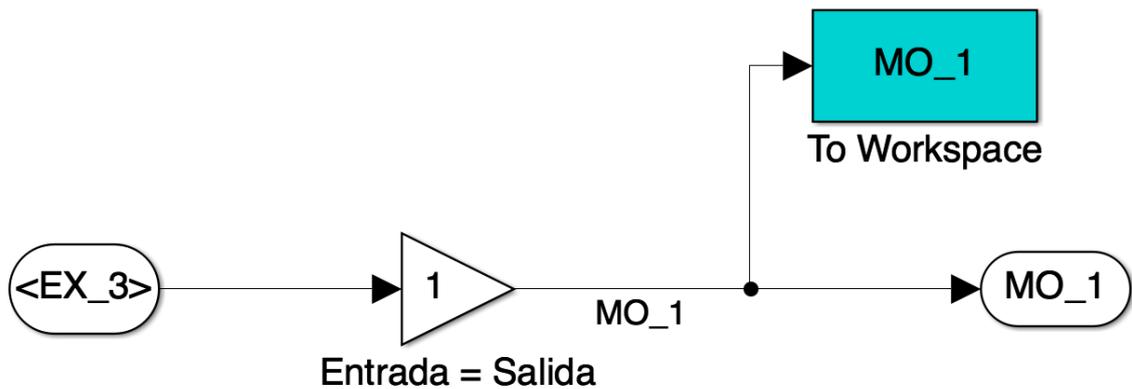
Modelo Original - Caldera



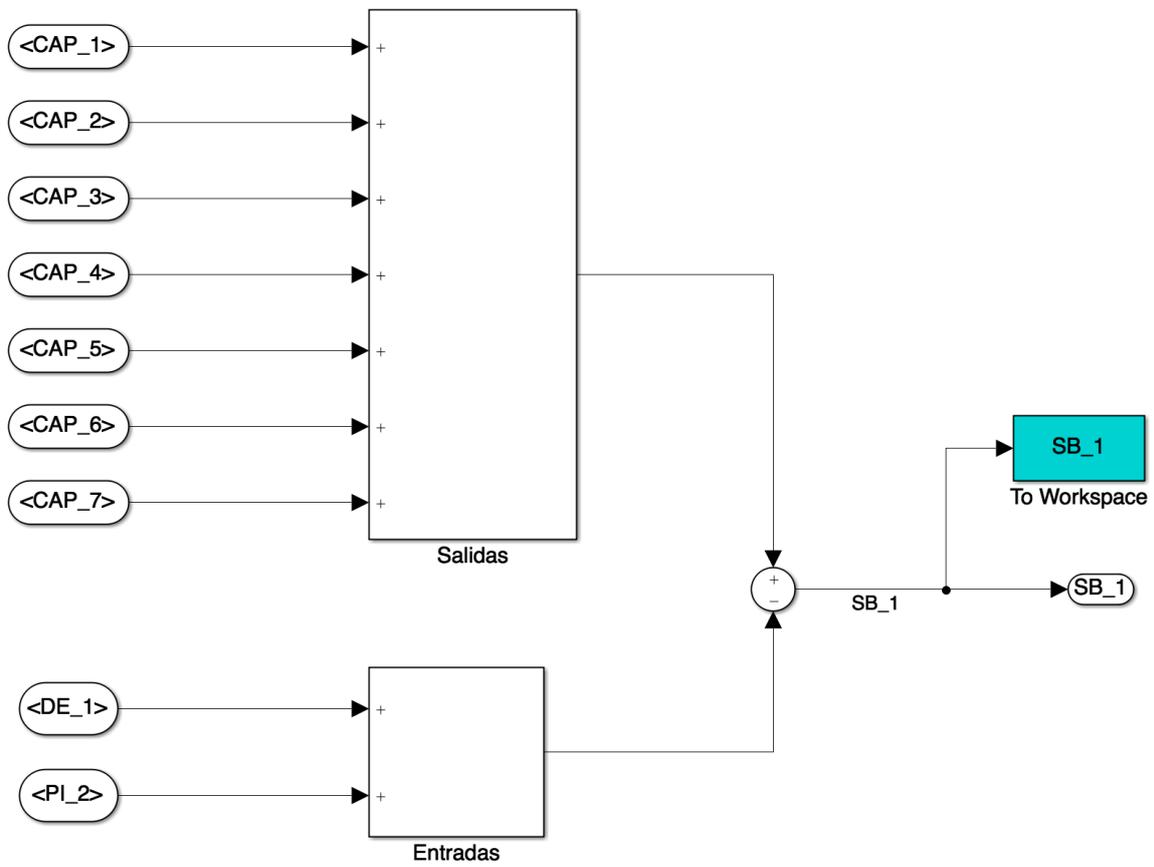
Modelo Original - Precipitación de Impurezas



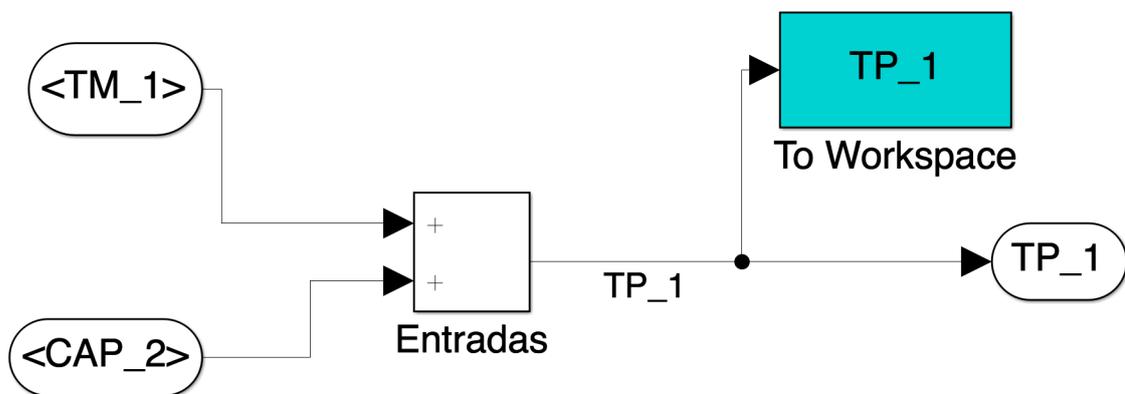
Modelo Original - Etapa: Obtención de ADU



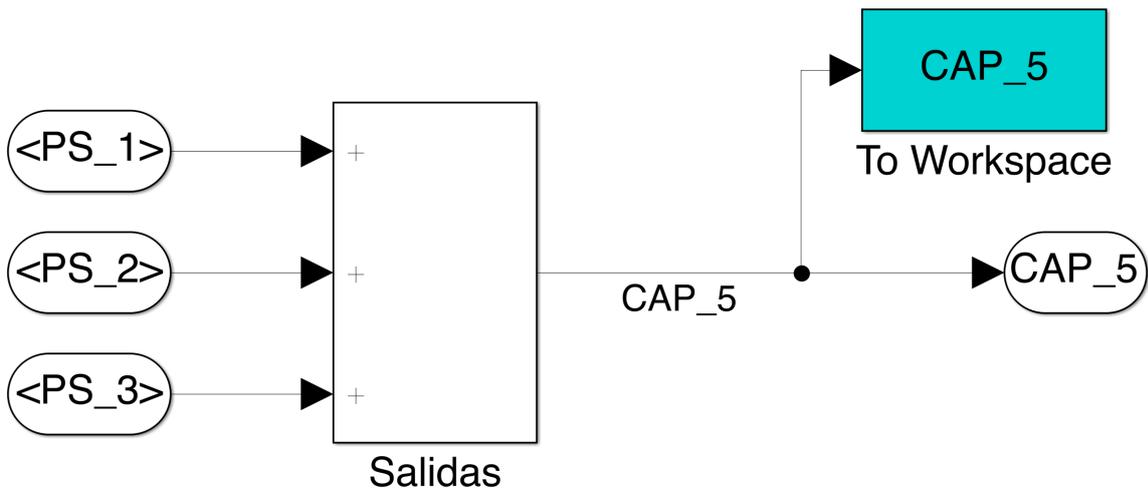
Modelo Original - Obtención de Molibdato de Calcio



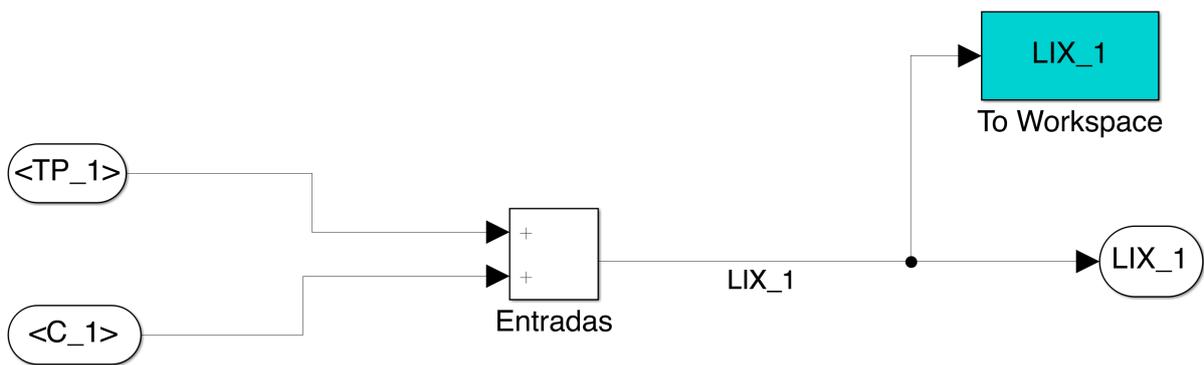
Modelo Original - Cisterna de Agua de Proceso



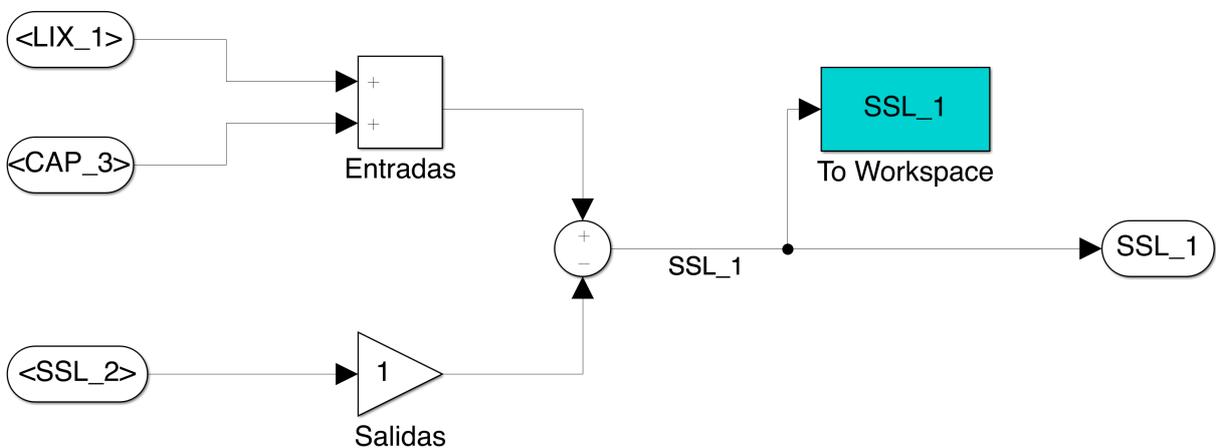
Modelo Original - Tanque de Pulpa



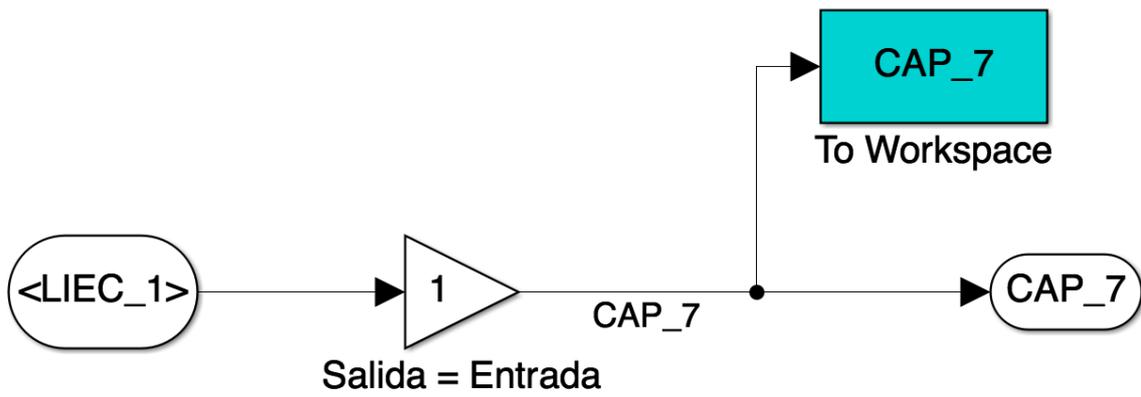
Modelo Original - Preparación de Soluciones



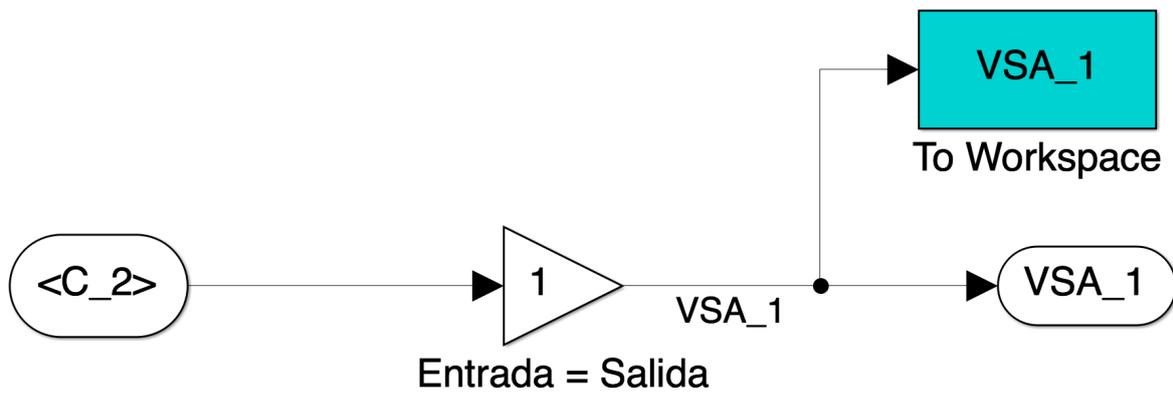
Modelo Original - Lixiviación



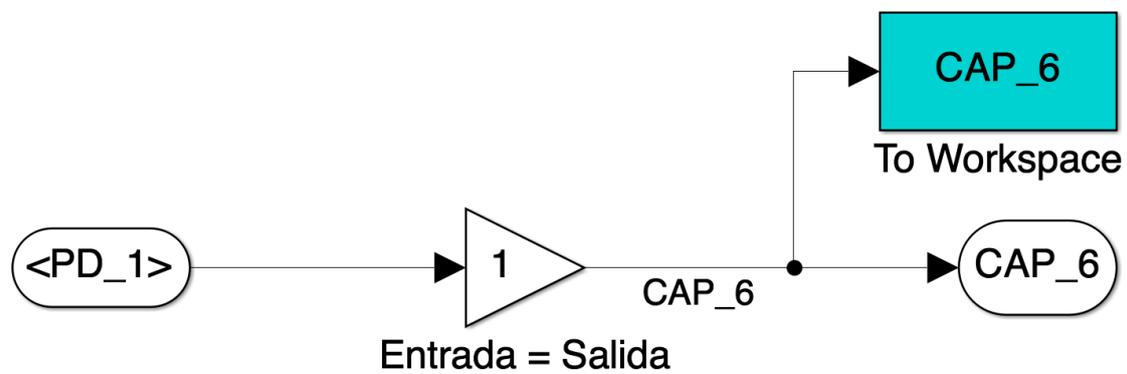
Modelo Original - Separación Sólido-Líquido



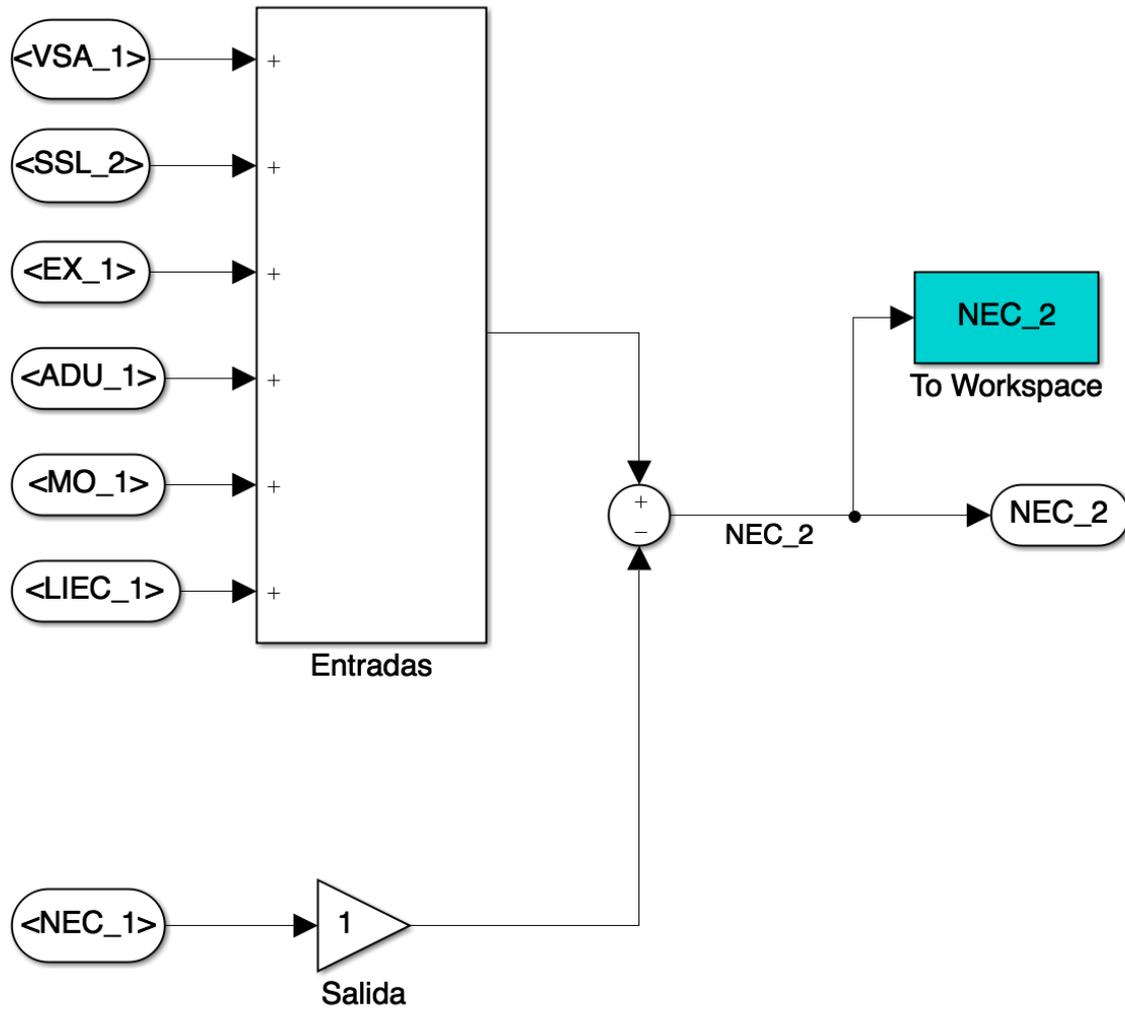
Modelo Original - Lavado de Instalaciones y Efluentes cloacales



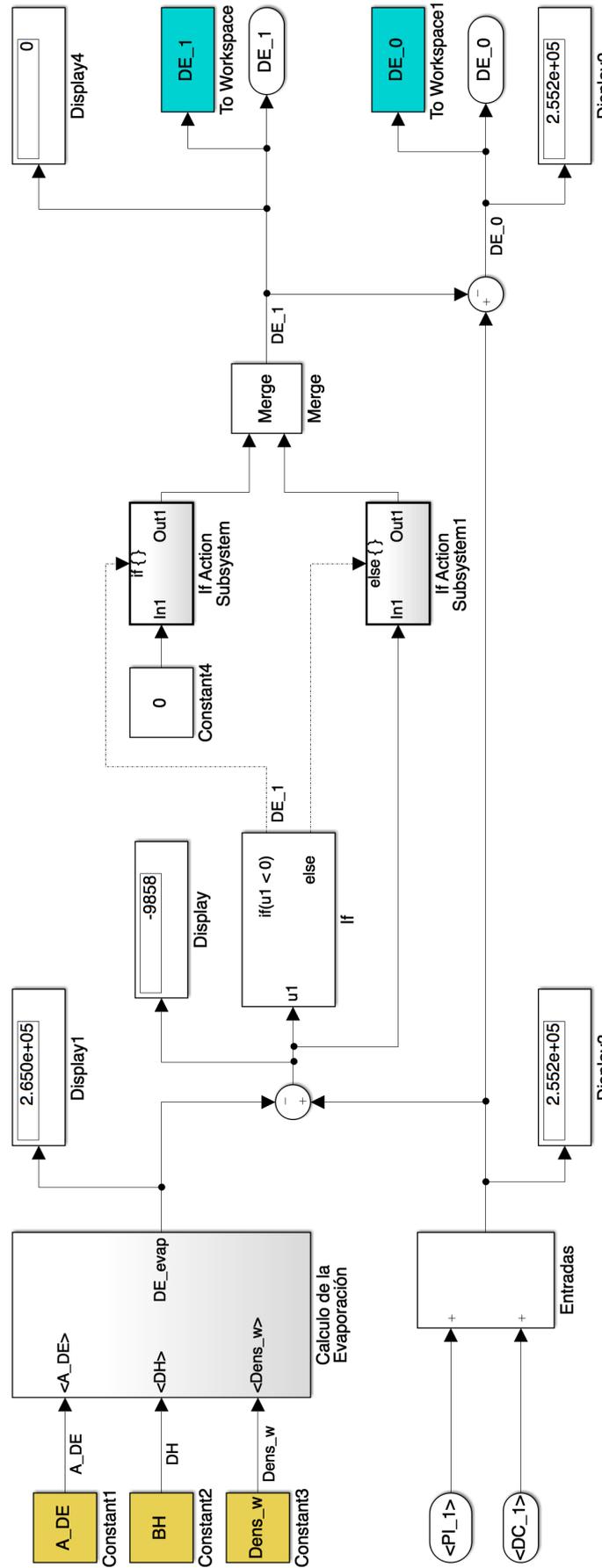
Modelo Original - Etapa: Vapor Servicios Auxiliares



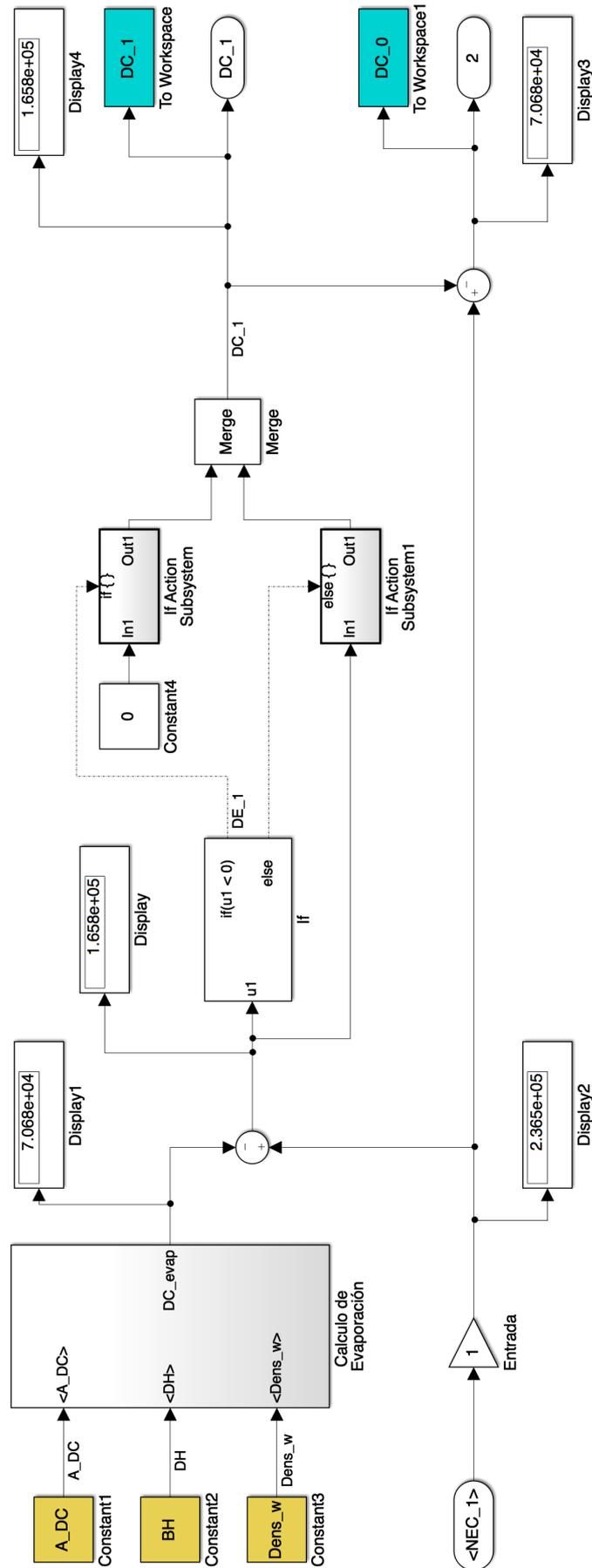
Modelo Original - Planta Desmineralizadora



Modelo Original - Etapa: Neutralización de Efluentes y Colas



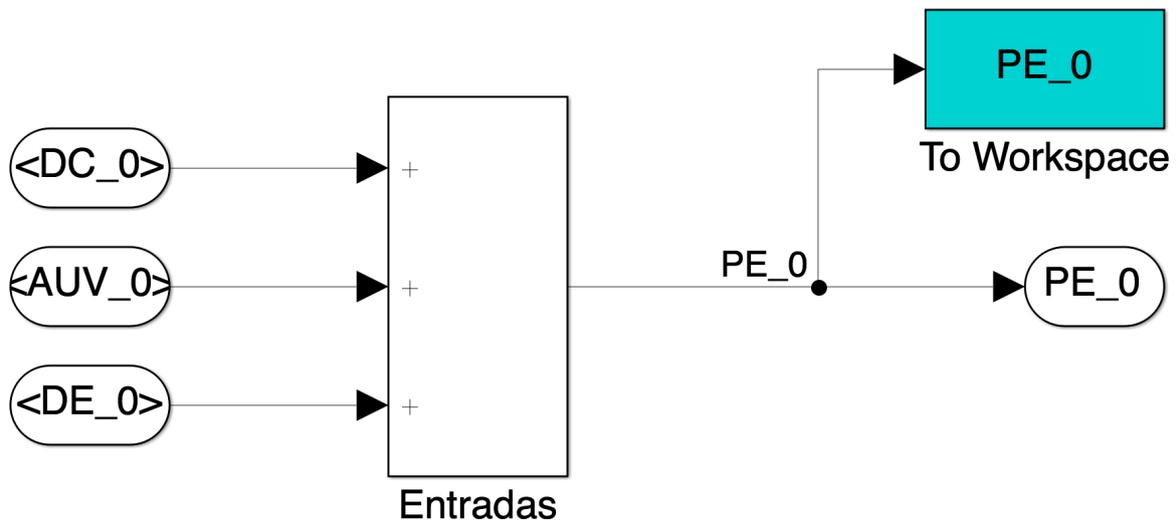
Modelo Original - Dique de Evaporación



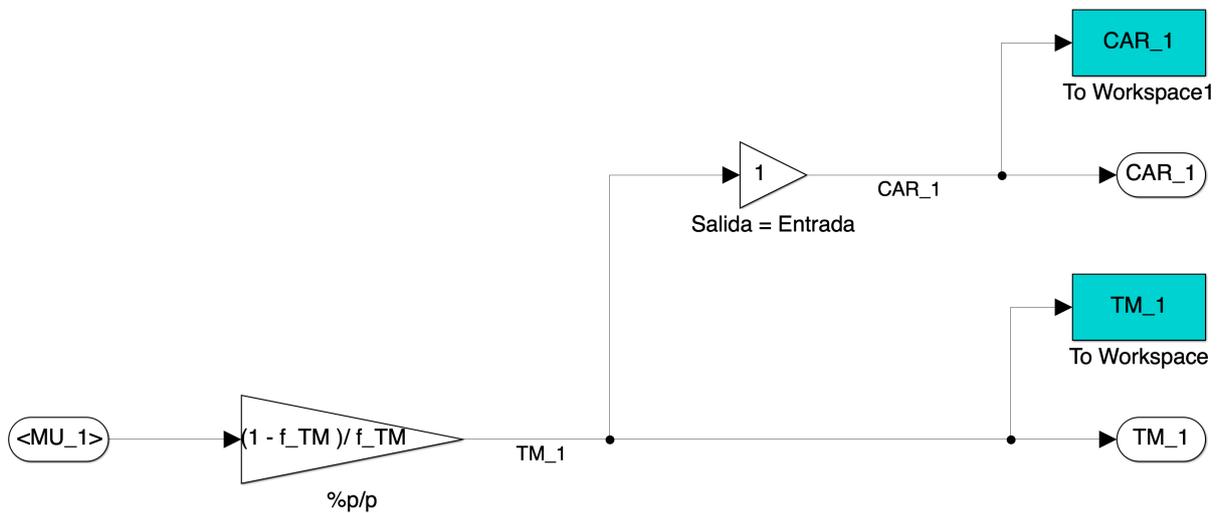
Modelo Original - Etapa: Dique de Colas

2. MODELO MODIFICADO - BALANCE DE AGUA PARA EL CMFCS

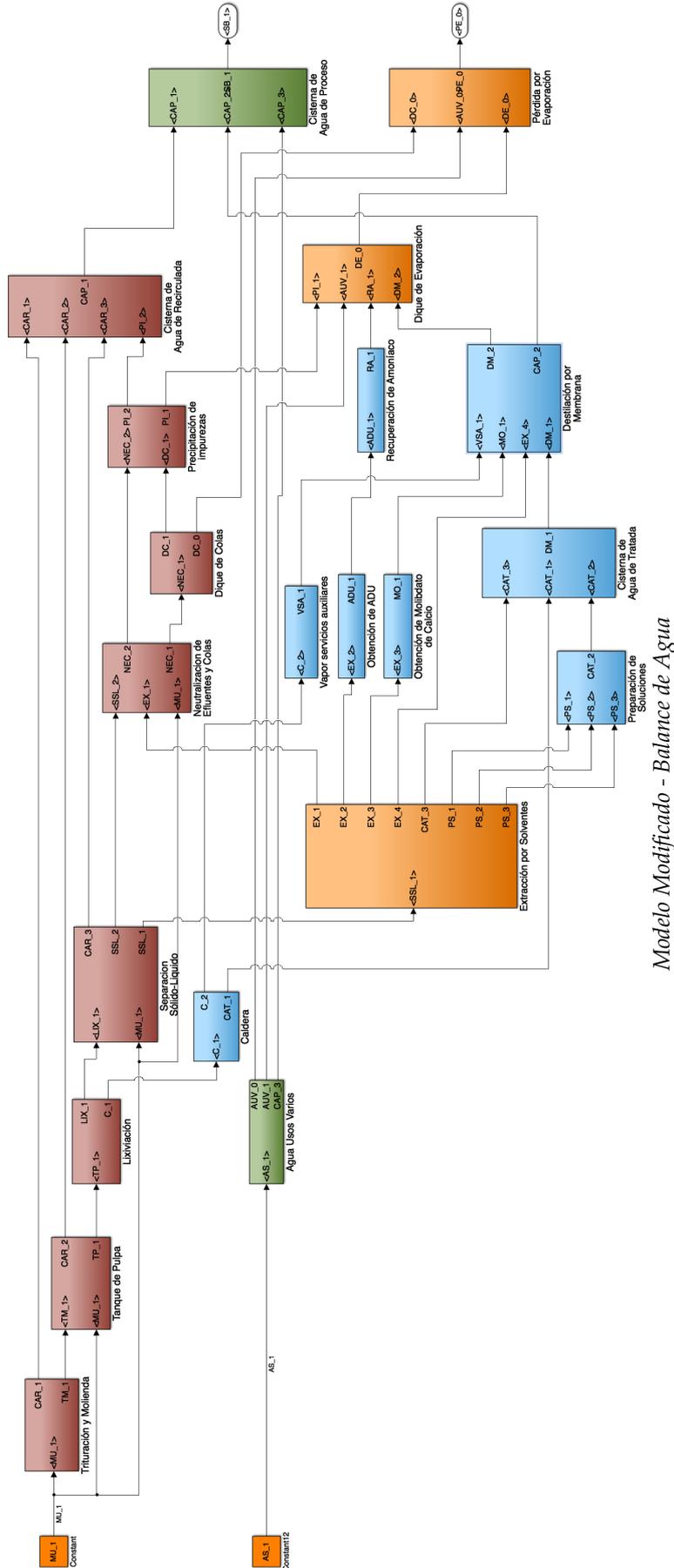
Modelo para Matlab®-Simulink®



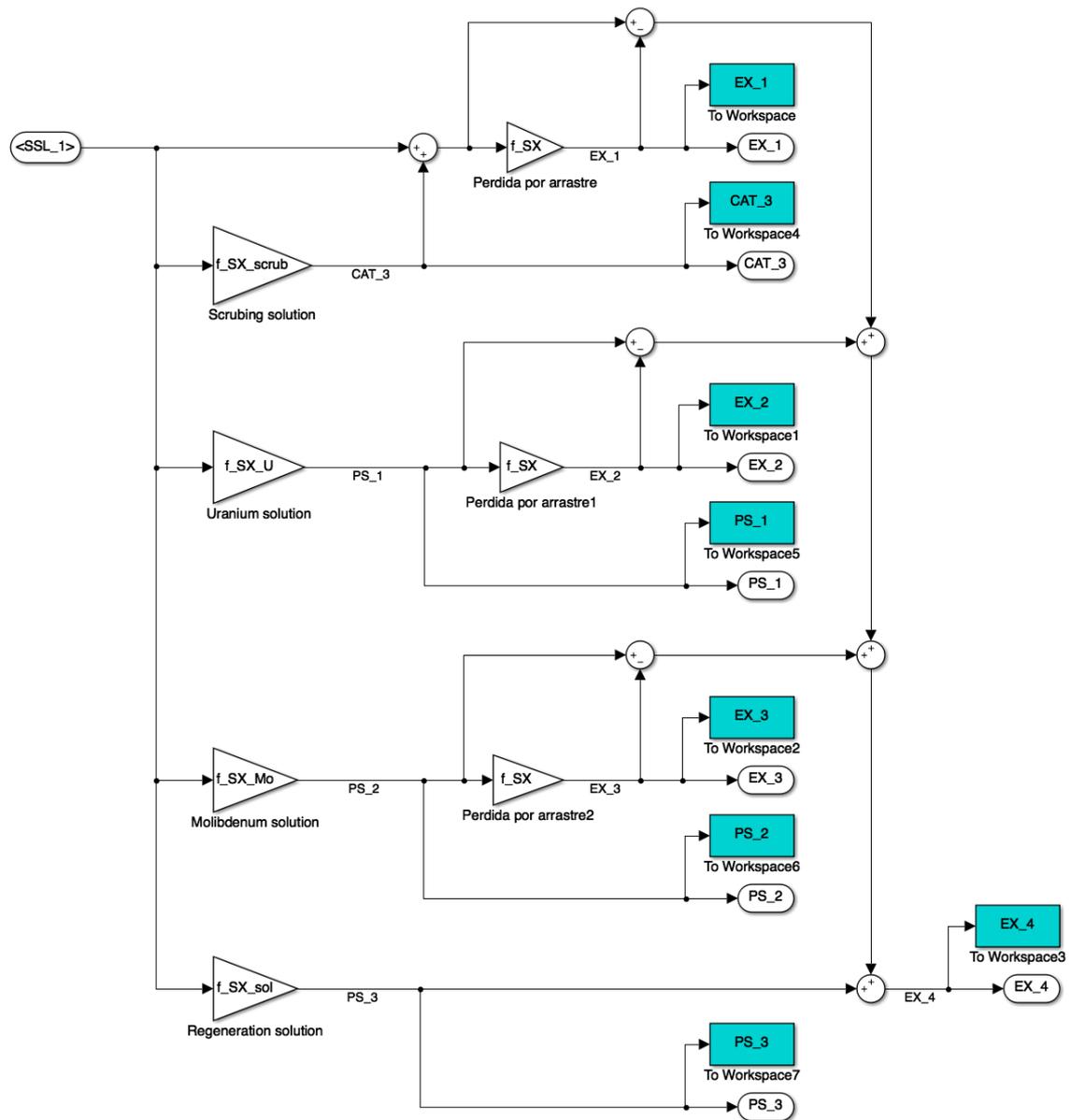
Modelo Modificado - Etapa: Pérdidas por Evaporación



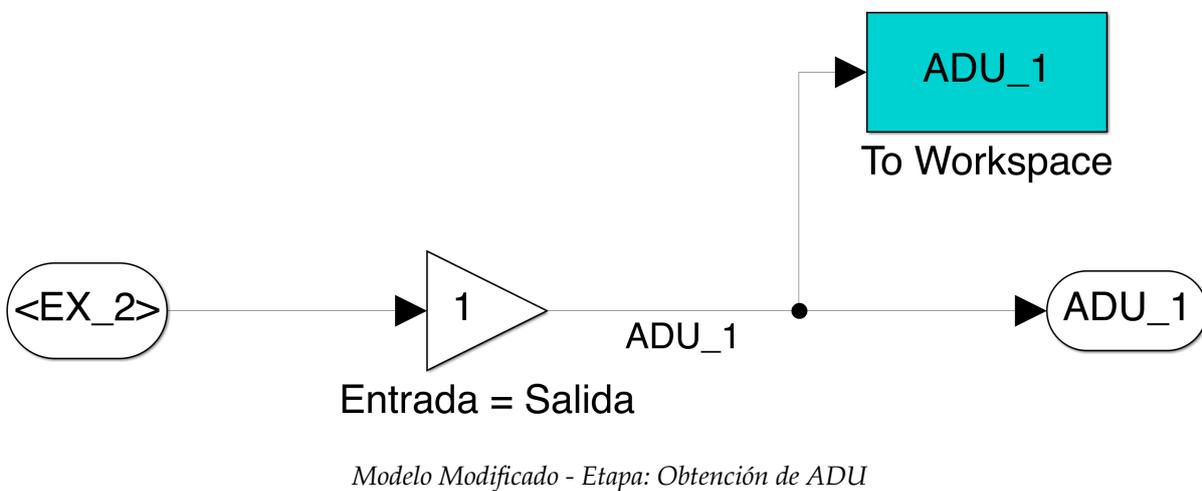
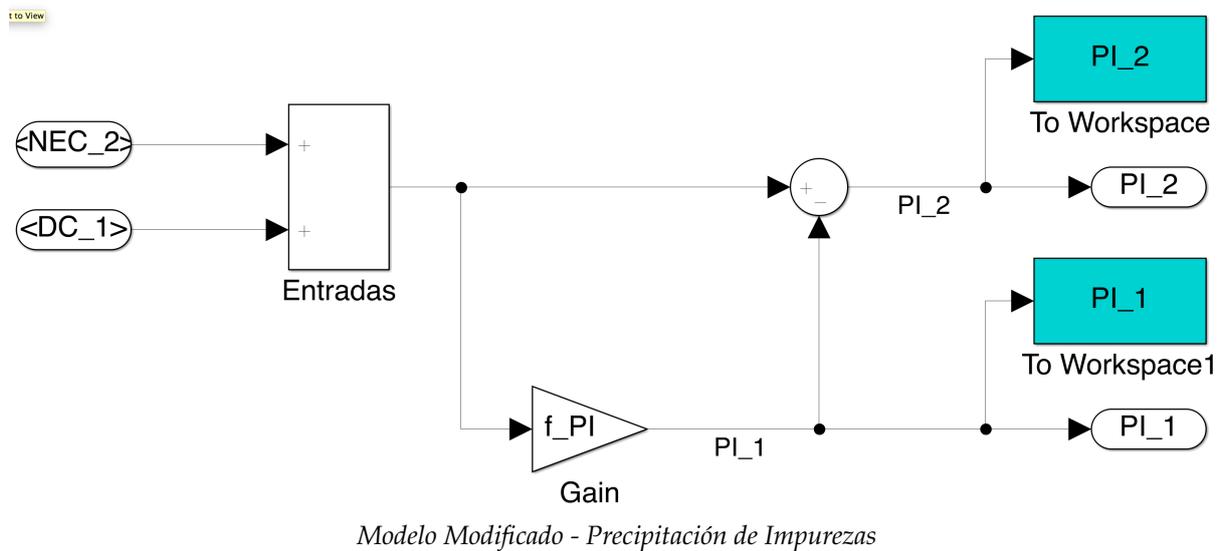
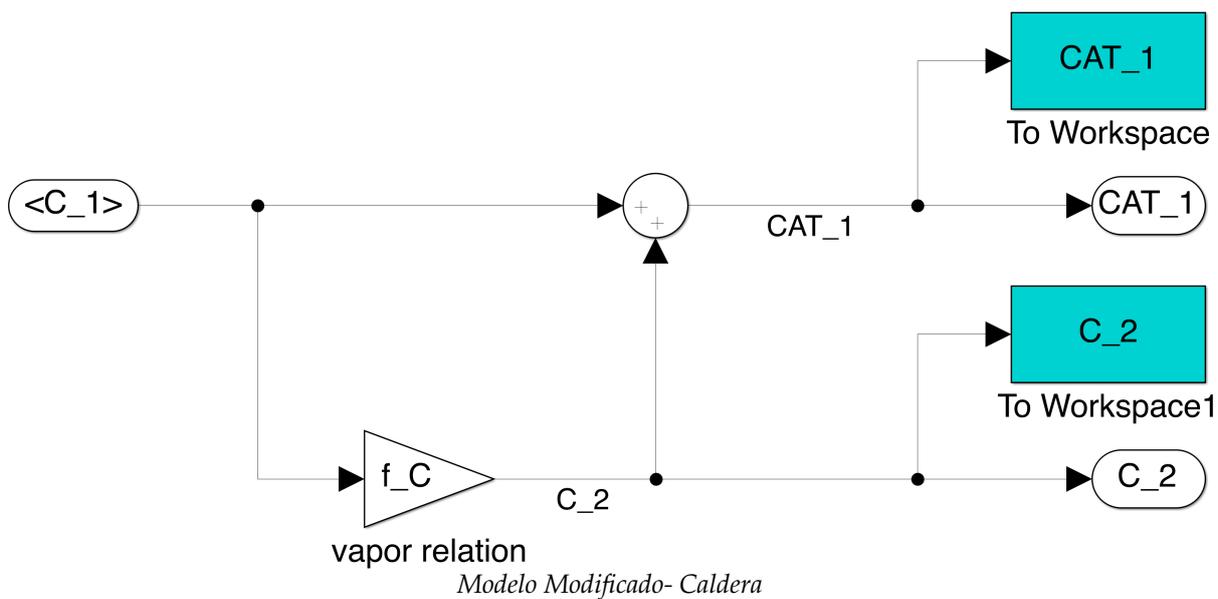
Modelo Modificado- Trituración y Molienda

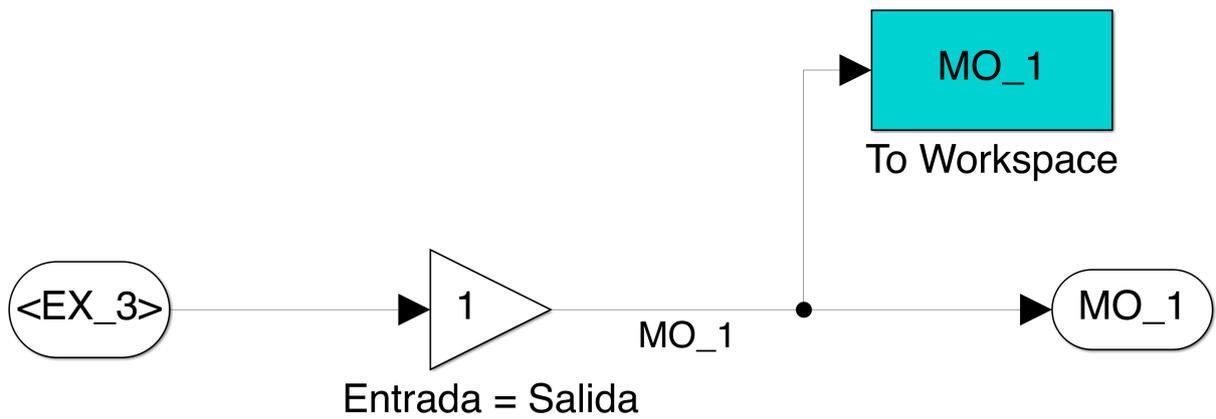


Modelo Modificado - Balance de Agua

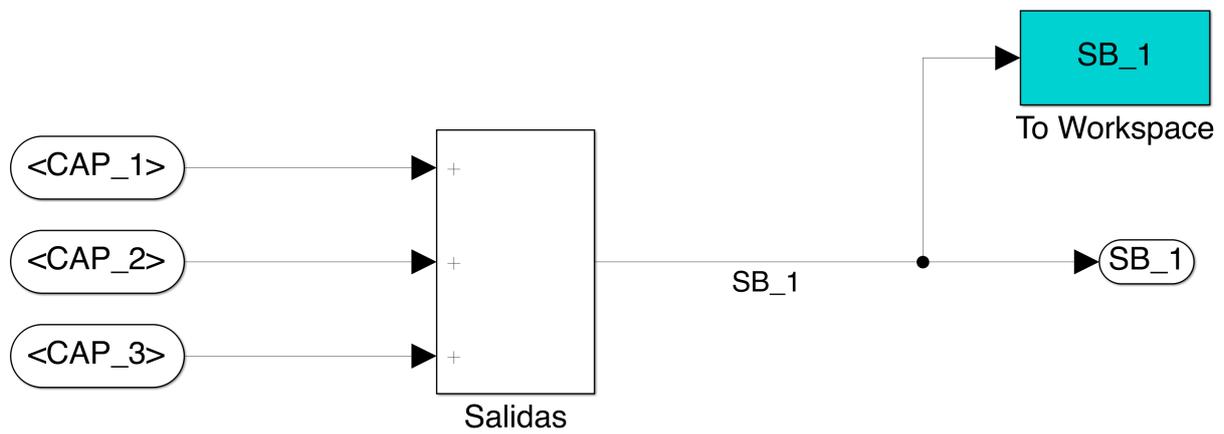


Modelo Modificado - Extracción por Solventes

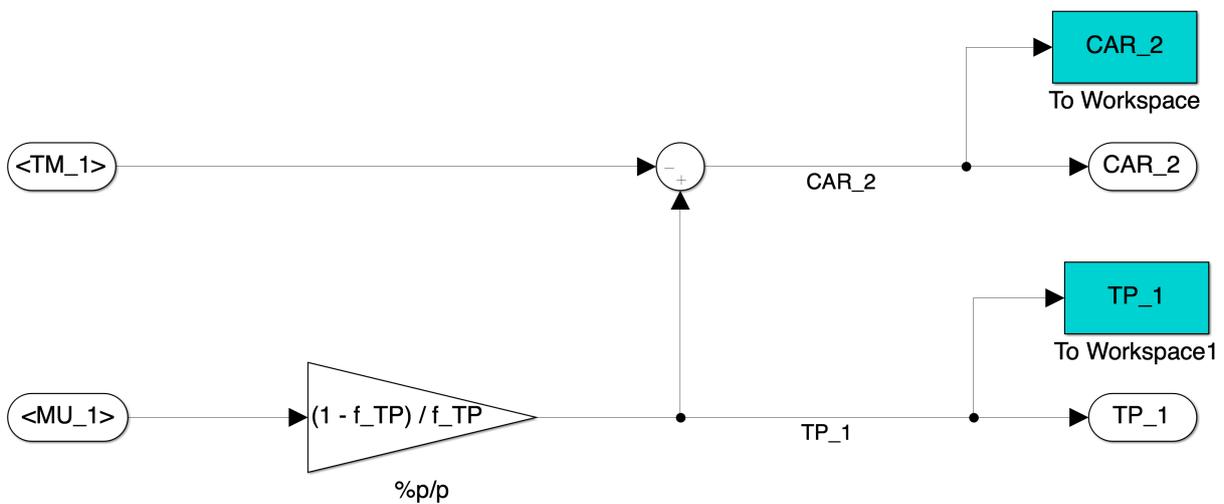




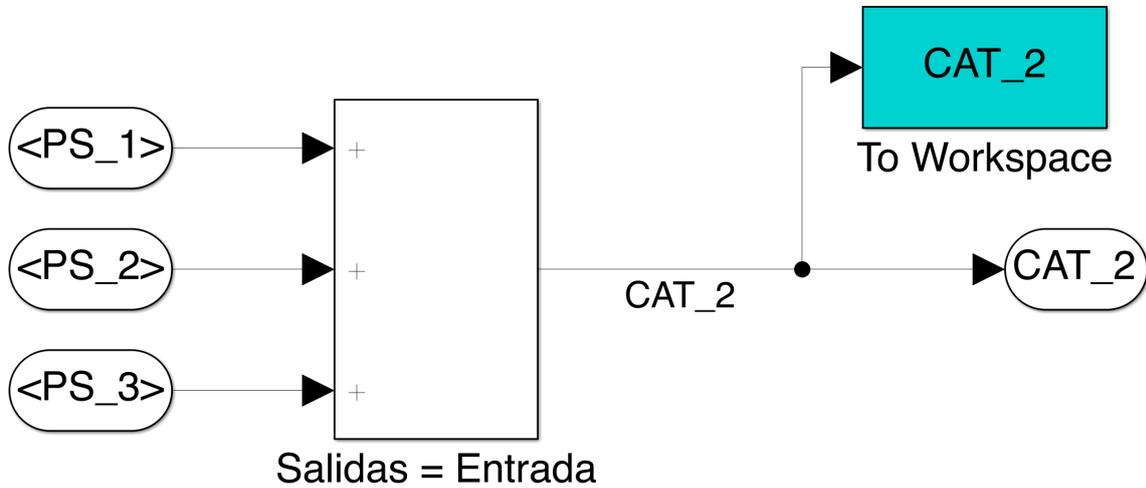
Modelo Modificado - Obtención de Molibdato de Calcio



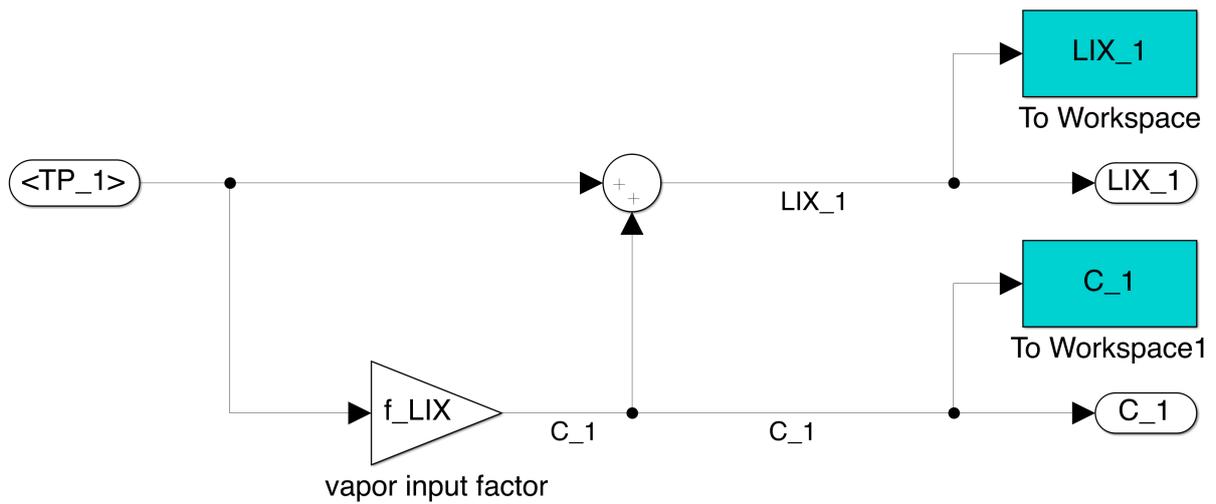
Modelo Modificado - Cisterna de Agua de Proceso



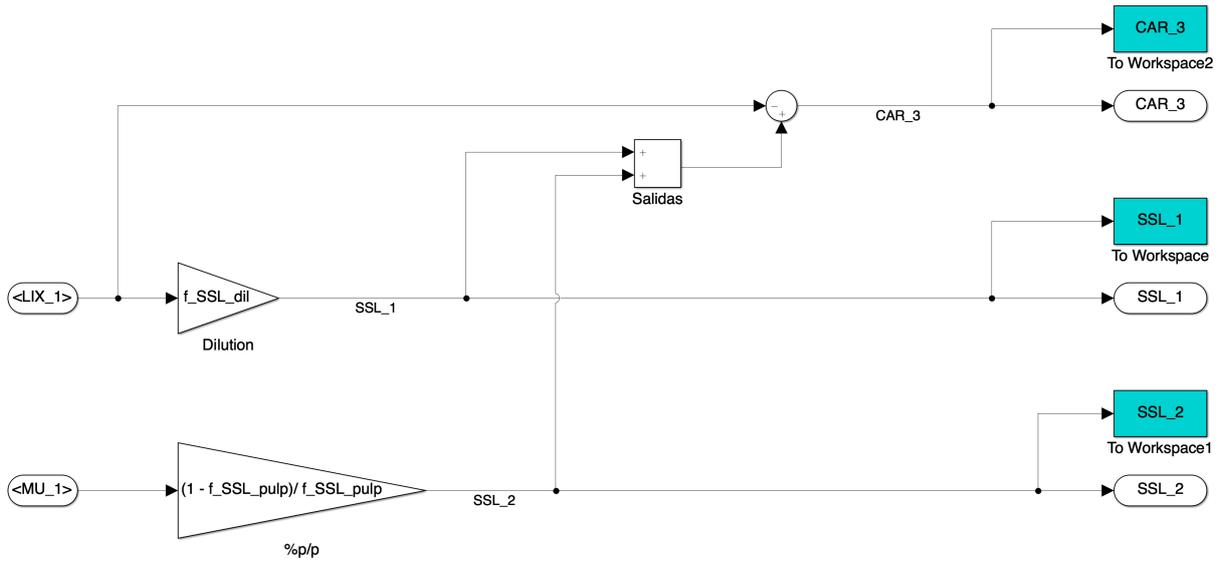
Modelo Modificado - Tanque de Pulpa



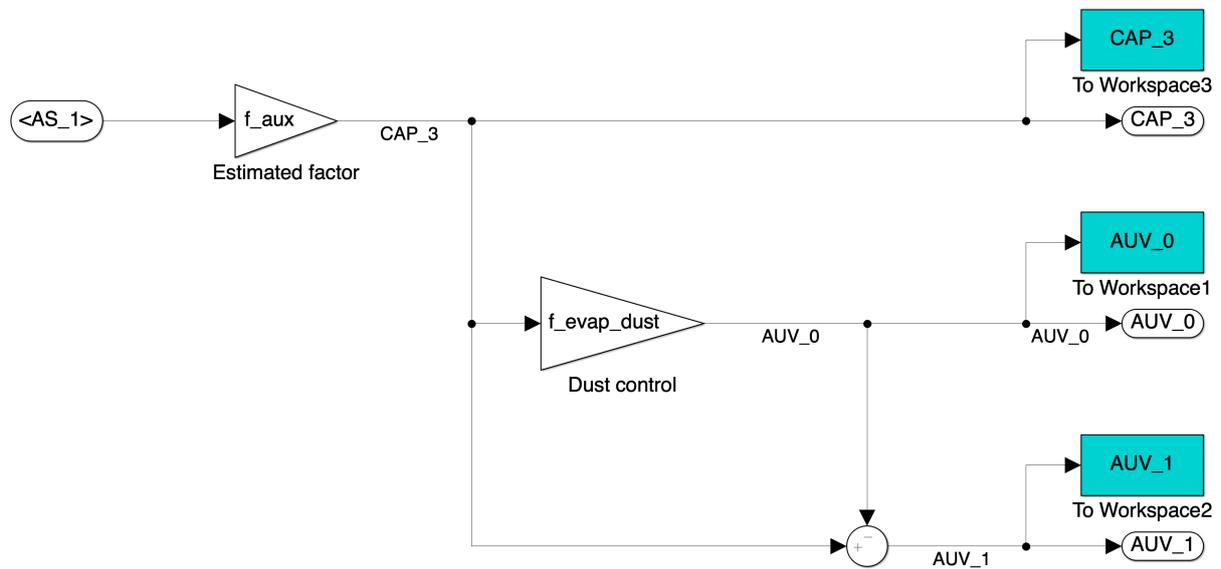
Modelo Modificado - Preparación de Soluciones



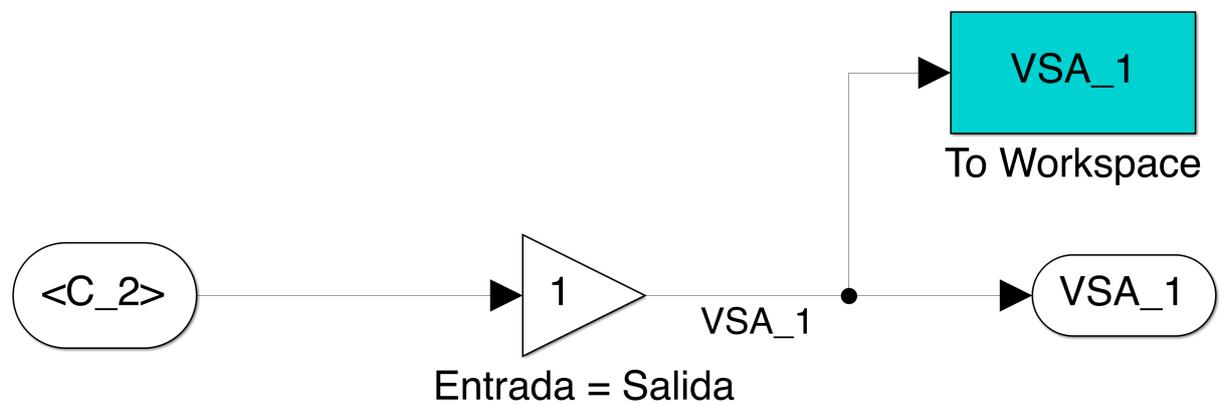
Modelo Modificado - Lixiviación



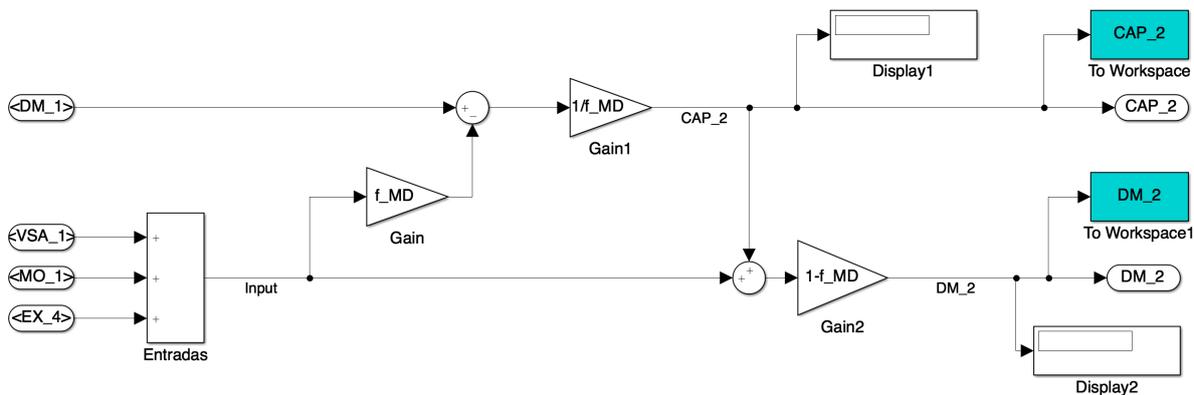
Modelo Modificado - Separación Sólido-Líquido



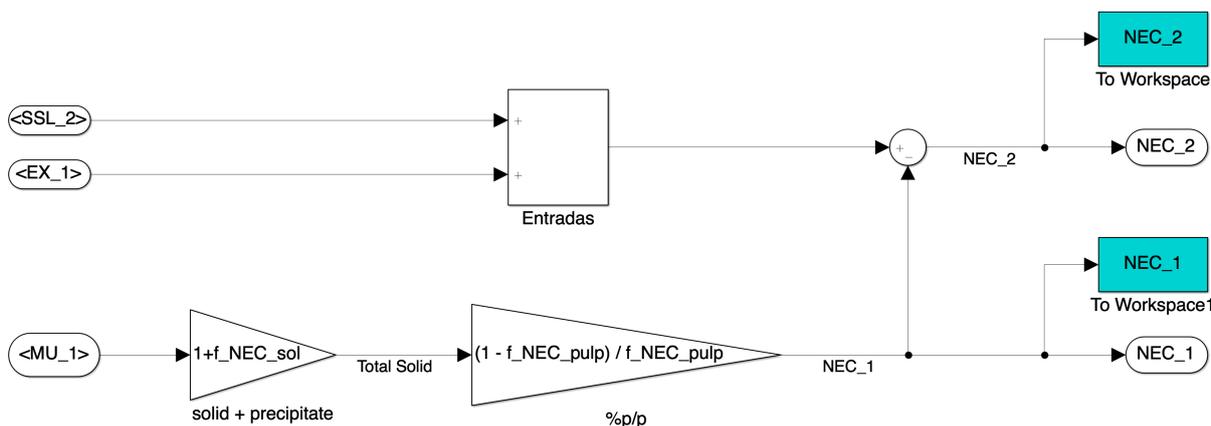
Modelo Modificado - Agua Usos Varios



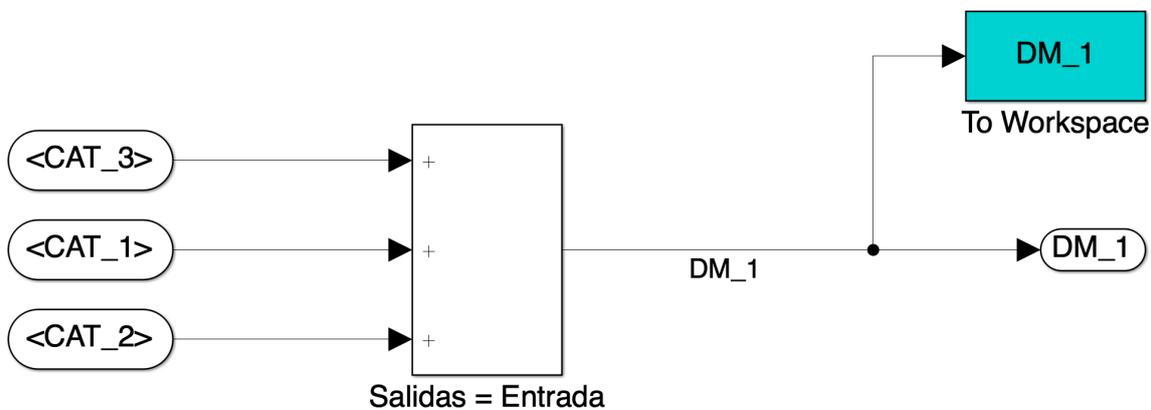
Modelo Modificado - Etapa: Vapor Servicios Auxiliares



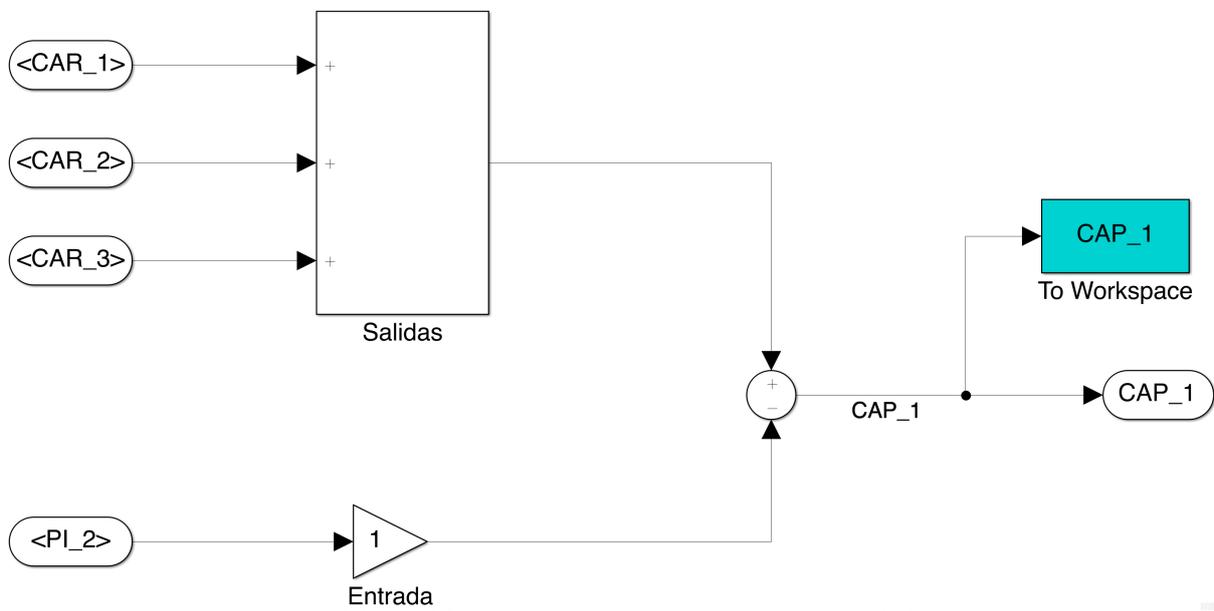
Modelo Modificado - Destilación por Membrana



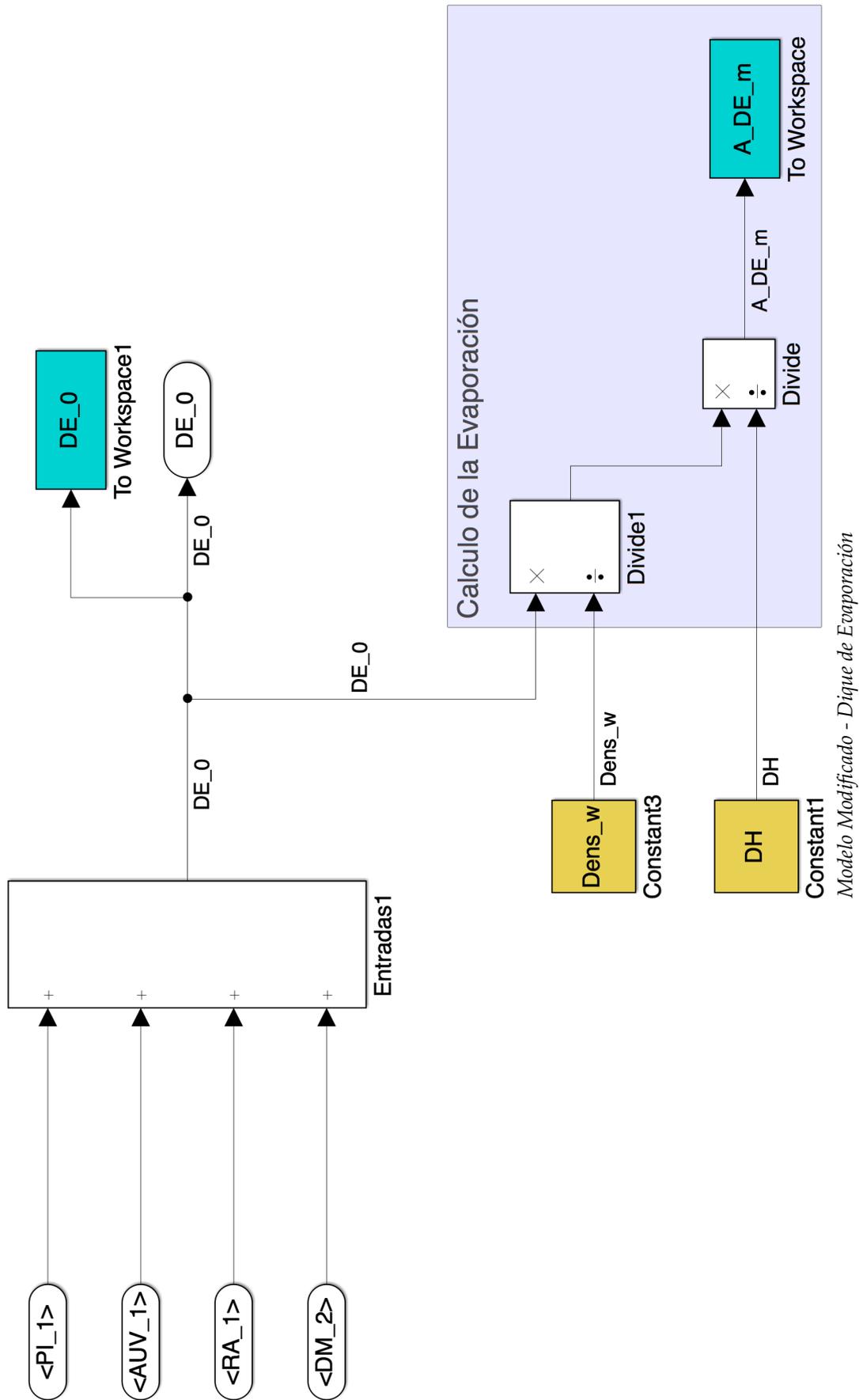
Modelo Modificado - Etapa: Neutralización de Efluentes y Colas

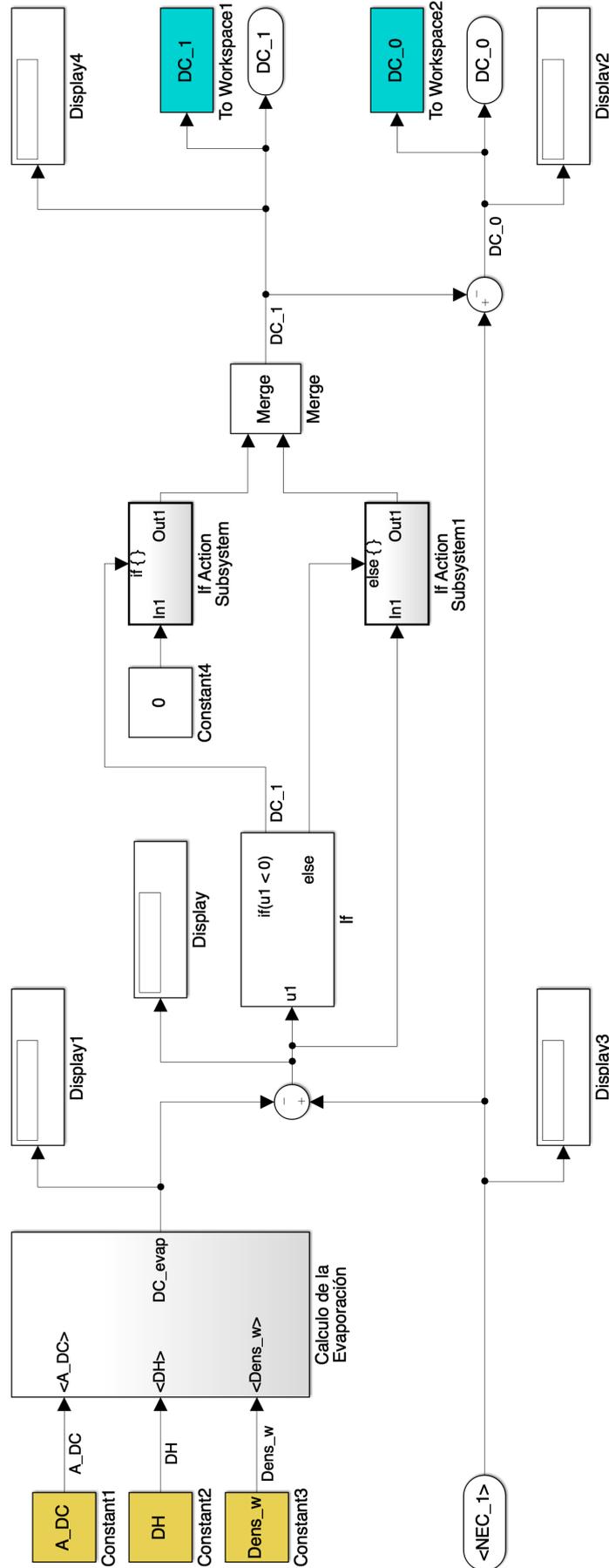


Modelo Modificado - Etapa: Cisterna de Agua Tratada



Modelo Modificado - Etapa: Cisterna de Agua Recirculada





Modelo Modificado - Etapa: Dique de Colas

3. MODELO MODIFICADO - SIMULACIONES

- **Caso 1:** f-MD = 0,80
- **Caso 2:** f-MD = 0,63
- **Caso 3:** f-MD = 0,80 y MU-1*1,25
- **Caso 4:** Sin MD
- **Caso 5:** Sin MD y MU-1*0,90
- **Caso 6:** Sin MD y f-SSL-dil*0,85

Modelo Modificado - Resultado de las Simulaciones. Fuente: (Propia)

Id	1	2	3	4	5	6
ADU-1	14.967	14.967	18.709	14.967	13.470	12.722
AS-1	262.800	262.800	262.800	262.800	262.800	262.800
AUV-0	13.140	13.140	13.140	13.140	13.140	13.140
AUV-1	13.140	13.140	13.140	13.140	13.140	13.140
C-1	26.284	26.284	32.854	26.284	23.655	26.284
C-2	17.522	17.522	21.903	17.522	15.770	17.522
CAP-1	161.536	161.536	186.901	161.536	151.391	145.450
CAP-2	41.382	76.345	51.728	96.341	86.707	88.461
CAP-3	26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	26.280
CAR-1	97.611	97.611	122.014	97.611	87.850	97.611
CAR-2	130.149	130.149	162.686	130.149	117.134	130.149
CAR-3	461.832	461.832	577.290	461.832	415.649	374.949
CAT-1	43.806	43.806	54.757	43.806	39.425	43.806
CAT-2	47.264	47.264	59.080	47.264	42.538	40.175
CAT-3	5.271	5.271	6.589	5.271	4.744	4.480
DC-0	70.680	70.680	70.680	70.680	70.680	70.680
DC-1	168.468	168.468	228.255	168.468	144.553	168.468
DE-0	145.379	180.341	181.089	200.337	180.557	176.371
DM-1	96.341	96.341	120.426	96.341	86.707	88.461
DM-2	24.085	59.048	30.107	79.044	71.140	69.816
EX-1	555.266	555.266	694.082	555.266	499.739	471.976
EX-2	14.967	14.967	18.709	14.967	13.470	12.722
EX-3	14.967	14.967	18.709	14.967	13.470	12.722
EX-4	46.555	46.555	58.193	46.555	41.899	39.572
LIX-1	254.044	254.044	317.554	254.044	228.639	254.044
MO-1	14.967	14.967	18.709	14.967	13.470	12.722
NEC-1	239.148	239.148	298.935	239.148	215.233	239.148
NEC-2	452.774	452.774	565.967	452.774	407.496	369.484
PE-0	229.199	264.161	264.909	284.157	264.377	260.191
PI-1	93.186	93.186	119.133	93.186	82.807	80.693
PI-2	528.055	528.055	675.089	528.055	469.242	457.259
PS-1	15.755	15.755	19.693	15.755	14.179	13.392
PS-2	15.755	15.755	19.693	15.755	14.179	13.392
PS-3	15.755	15.755	19.693	15.755	14.179	13.392
RA-1	14.967	14.967	18.709	14.967	13.470	12.722
SB-1	229.199	264.161	264.909	284.157	264.377	260.191
SSL-1	579.219	579.219	724.024	579.219	521.297	492.336
SSL-2	136.656	136.656	170.820	136.656	122.990	136.656
TM-1	97.611	97.611	122.014	97.611	87.850	97.611
TP-1	227.760	227.760	284.700	227.760	204.984	227.760
VSA-1	17.522	17.522	21.903	17.522	15.770	17.522