

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Optimización técnico-económica de la planta minero metalúrgica
SOMILOR S.A.

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo la obtención del Título de:

**Magíster en Minas Mención Mineralurgia y Metalurgia
Extractiva**

Presentado por:

Aracelly Gissella Palacios Moreno

Cristhian Andrés Pineda Procel

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía espiritual. A mi madre, Livia, quien me enseñó a ser fuerte y perseverante. A mi gran amor Ismael por creer siempre en mí, por su apoyo y amor infinito. A mis hermanos Diana y Byron por las muestras de amor y confianza. A Estefani, Luis y Danna, mis queridos sobrinos porque llenan de alegría cada día de mi vida.

Aracelly P.

A Dios.

A toda mi familia, en especial a mi madre María Herminia y mi padre Gonzalo.

A mis hermanos Joffre y Kerly.

A mis sobrinos Giada, Mateo, Amy e Issy.

A mis amigos, Chester y compañeros de SOMILOR S.A.

Cristhian P.

AGRADECIMIENTOS

Nuestra eterna gratitud a todas las personas que con su soporte técnico y humano colaboraron para realizar este trabajo de investigación.

A SOMILOR S.A. gracias por la apertura, en especial al Ing. Marcelo Apolo.

Agradecemos de manera especial y sincera al Dr. Juan María Aguado, por su paciencia, disponibilidad y generosidad para compartir su experiencia y amplio conocimiento.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Aracelly Gissella Palacios Moreno* y *Cristhian Andrés Pineda Procel* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Aracelly Gissella Palacios Moreno

Cristhian Andrés Pineda Procel

EVALUADORES

.....
Dr. Juan María Menéndez Aguado

PROFESOR TUTOR

.....
Dra. Dulce María Gómez Limón

PROFESOR EVALUADOR

RESUMEN

Gran parte de las plantas de beneficio de minerales de la pequeña y mediana minería del país, han sido diseñadas e instaladas con equipos sin estudio previo. El presente proyecto se desarrolla en la Sociedad Minera Liga de Oro, empresa dedicada a la extracción y procesamiento de mineral aurífero.

Con la finalidad de una optimización en los procesos, se realizó un estudio técnico mediante modelización en MODSIM y un análisis económico empleando la metodología de Andrew Mular descrita en su libro CAPCOSTS. Las variaciones producidas de forma natural en la alimentación y cambios en su diseño original dificultaron conocer el punto óptimo de la planta.

Las simulaciones fueron divididas en tres secciones para mayor facilidad en el manejo de parámetros y costos de los equipos. Los resultados permitieron una evaluación rápida de diferentes escenarios sin afectar la operación real en la planta.

Los resultados de la simulación permitieron identificar posibilidades de mejora en la configuración del diagrama de flujo, con el objetivo de optimizar el proceso, como por ejemplo el sobredimensionamiento en la zaranda de doble piso de malla y el infra dimensionamiento de la zaranda de alta frecuencia.

El análisis de sensibilidad indicó que el parámetro que más afecta es el de ingresos, que a su vez depende del tonelaje procesado y del precio de venta del oro. Una variación del -8 % en este parámetro supuso una reducción de más de diez millones de dólares.

Palabras claves: Minería, planta de beneficio, MODSIM, análisis de sensibilidad.

ABSTRACT

Most of the mineral beneficiation plants of small and medium scale in the country have been designed and installed with equipment without prior study. The present project is developed at Sociedad Minera Liga de Oro, a company dedicated to the extraction and processing of gold ore.

In order to optimize the processes, a technical study was carried out using MODSIM modeling software and an economic analysis using Andrew Mular's methodology described in his book CAPCOSTS. The variations produced naturally in the feed and changes in its original design make it difficult to know the optimum point of the plant.

The simulations were divided into three sections to facilitate the management of equipment parameters and costs. The results allowed a quick evaluation of different scenarios without affecting the actual plant operation.

The results of the simulation allowed the identification of improvement possibilities in the configuration of the flow diagram, with the objective of optimizing the process, such as the oversizing of the double-deck screen and the undersizing of the high-frequency screen.

The sensitivity analysis indicated that the parameter most affected is revenue, which in turn depends on the tonnage processed and the selling price of gold. A variation of -8% in this parameter meant a reduction of more than ten million dollars.

Keywords: *Mining, beneficiation plant, MODSIM, sensitivity analysis.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Ubicación geográfica	4
1.4.2 Mineralización.....	5
1.4.3 Descripción del proceso.....	5
1.4.4 Software	14
1.4.5 Evaluación económica	15
CAPÍTULO 2	21
2. METODOLOGÍA	21
2.1 Simulación técnica	21
2.1.1 Diagrama de flujo.....	21
2.1.2 Sección 1: Trituración	22
2.1.3 Sección 2: Molienda.....	27

2.1.4	Sección 3: Flotación.....	31
2.2	Evaluación económica	34
2.2.1	Estimación de los costos de equipos principales	34
2.2.2	Estimación de costos de capital	40
CAPÍTULO 3.....		42
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	42
3.1	Simulación en MODSIM	42
3.1.1	Sección 1: Trituración	42
3.1.2	Sección 2: Molienda.....	44
3.1.3	Sección 3: Flotación.....	45
3.2	Estimación de coste de equipos principales	46
3.2.1	Zaranda de doble piso de malla	46
3.2.2	Trituradora de mandíbula.....	47
3.2.3	Zaranda de alta frecuencia	47
3.2.4	Trituradora de cono	47
3.2.5	Hidrociclón.....	47
3.2.6	Molino de bolas.....	48
3.2.7	Celdas de flotación	48
3.3	Estimación de costos de capital	49
3.4	Análisis de sensibilidad	49
3.4.1	Variación de ingresos por kg/año de Au en lingotes	49
3.4.2	Variación de ingresos por kg/año de Au en concentrado	50
3.4.3	Variación de costos de equipos principales	51
3.4.4	Variación de energía eléctrica.....	51
3.4.5	Variación de costos operativos	52
CAPÍTULO 4.....		53
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53

4.1 Conclusiones.....	53
4.2 Recomendaciones.....	54

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

CAPEX	Costos de Capital
DSM	Dutch State Mine
EE.UU.	Estados Unidos
ENR	Engineering News Record
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
M&M	Mina y Molino
M&S	Marshall and Swift
MODSIM	Modular Simulation
NR	Nelson Refinery
OF	Overflow
OPEX	Costos de Operación
SOMILOR	Sociedad Minera Liga de Oro
TIR	Taza Interna de Retorno
UF	Underflow
VAN	Valor Actual Neto

SIMBOLOGÍA

\$	Dólar
%	Porcentaje
A	Amperio
Ag	Plata
As	Arsénico
Au	Oro
AuCN-	Cianuro de oro
C	Carbono
Ca	Calcio
cm	Centímetro
Cu	Cobre
Fe	Hierro
ft	Pie
ft ³	Pie cúbico
g/cm ³	Gramo por centímetro cúbico
g/l	Gramos por litro
g/t	Gramo por tonelada
H ₂ O	Agua
in	Pulgada
in ²	Pulgadas cuadradas
kg	Kilogramo
kW	Kilovatio
l/min	Litro por minuto
m	Metro
m/min	Metros por minuto
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
m ³ /h	Metro cúbico por hora
mm	Milímetro
O	Oxígeno
Pb	Plomo
S	Azufre

Si	Silicio
t	Tonelada
t/h	Tonelada por hora
Te	Teluro
Zn	Zinc
μm	Micrómetro

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación geográfica SOMILOR S.A.	4
Figura 1.2 Locomotora y vagones	6
Figura 1.3 Zaranda vibratoria con dos pisos de malla	8
Figura 1.4 Trituradora de mandíbulas	8
Figura 1.5 Trituradora de cono	9
Figura 1.6 Zaranda de alta frecuencia	9
Figura 1.7 Molino de bolas	10
Figura 1.8 Hidrociclones.....	11
Figura 1.9 Espesador	13
Figura 1.10 Ventana principal MODSIM	15
Figura 1.11 Diagrama de araña asociado con el análisis de sensibilidad	20
Figura 2.1 Diagrama de flujo Sección 1	22
Figura 2.2 Entrada de datos al sistema Sección 1	23
Figura 2.3 Modelo DCS1 Zaranda de doble piso de malla	24
Figura 2.4 Modelo Jaw1 Trituradora de mandíbulas.....	25
Figura 2.5 Modelo SCR1 de Zaranda de alta frecuencia	26
Figura 2.6 Modelo CSR1 Trituradora de cono	26
Figura 2.7 Diagrama de flujo Sección 2.....	28
Figura 2.8 Entrada de datos al sistema Sección 2.....	28
Figura 2.9 Parámetro Agua al hidrociclón.....	29
Figura 2.10 Parámetro Agua al molino	29
Figura 2.11 Modelo GMIL Molino de bolas	30
Figura 2.12 Modelo CYCL Hidrociclón	31
Figura 2.13 Diagrama de flujo Sección 3.....	32
Figura 2.14 Entrada de datos al sistema Sección 3.....	33
Figura 2.15 Zaranda de doble piso de malla Sección 1	34
Figura 2.16 Trituradora de mandíbula Sección 1	35
Figura 2.17 Zaranda de alta frecuencia Sección 1	36
Figura 2.18 Trituradora de cono Sección 1.....	37
Figura 2.19 Hidrociclón Sección 2.....	38
Figura 2.20 Molino de bolas Sección 2.....	39
Figura 2.21 Celdas de flotación Sección 3	39

Figura 3.1 Resultado simulación Sección 1	42
Figura 3.2 Resultado Zaranda de doble piso de malla	43
Figura 3.3 Resultado Trituradora de mandíbula	43
Figura 3.4 Resultado Zaranda de alta frecuencia	44
Figura 3.5 Resultado simulación Sección 2	44
Figura 3.6 Resultado Hidrociclón.....	45
Figura 3.7 Resultado simulación Sección 3	46
Figura 3.8 Variación de ingresos por kg/año de Au en lingotes	50
Figura 3.9 Variación de ingresos por kg/año de Au en concentrado	50
Figura 3.10 Variación de costo de equipos principales.....	51
Figura 3.11 Variación de Costo de energía eléctrica	52
Figura 3.12 Variación de costos operativos.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Mineralización	5
Tabla 2.1 Unidades de Sección 1 en MODSIM	22
Tabla 2.2 Especificaciones Zaranda doble piso de malla	24
Tabla 2.3 Especificaciones Trituradora de mandíbulas	24
Tabla 2.4 Especificaciones Zaranda alta frecuencia.....	25
Tabla 2.5 Especificaciones Trituradora de cono	26
Tabla 2.6 Unidades de Sección 2 en MODSIM	27
Tabla 2.7 Especificaciones Hidrociclón	31
Tabla 2.8 Unidades de Sección 3 en MODSIM	32
Tabla 2.9 Datos Trituradora de mandíbula	35
Tabla 2.10 Datos Trituradora de cono	37
Tabla 3.1 Costo de equipos principales.....	48
Tabla 3.2 Costos de capital.....	49

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El oro produce grandes beneficios y márgenes de utilidad a escala mundial, que resultan favorables en proyectos mineros cuando se aplica una correcta evaluación. Sin embargo, pueden verse afectados por falta de conocimiento técnico y fuentes de información real y/o cuantificables generando una baja producción (Roldan, 2014).

La aplicación técnica del conjunto de variables de diseño, operación y recurso mineral, dan como resultado una producción óptima generando altos impactos económicos. Por lo tanto, la valoración del rendimiento de las plantas es fundamental para la distribución técnica y económica. Además, es importante que se realice la evaluación de la situación actual del mercado, con el análisis de un método válido de medición para la recuperación de minerales (Obregon, 2016).

Uno de los factores problemáticos que afronta el sector minero dentro de sus procesos convencionales, para la extracción del oro y minerales de interés, es la falta de eficiencia en la operación de sus equipos. Esto se debe a la aplicación empírica de conocimiento para la toma de decisiones en sus diseños de procesamiento (Moises Bustamante, 2016).

El presente proyecto aplica una metodología usando simulaciones con el software MODSIM (Rubilar, 2006) y una estimación de costos para la ampliación de la planta de beneficio SOMILOR S.A. ubicada en el sur del Ecuador. Las simulaciones permiten conocer los cambios operativos en los procesos, antes de una inversión económica (Ramírez, 1996).

En los últimos años se ha intensificado el estudio en el procesamiento de minerales dentro de la pequeña minería a nivel nacional. Se ha optado como recurso viable para los diseños de plantas, la realización de simulaciones con la

ayuda de herramientas digitales, que permiten tener una perspectiva más amplia para la selección técnica de equipos de producción (M.A. FORD, 1984).

Avilés y Ortega, tuvieron como objeto caracterizar las arcillas encontradas en el Yacimiento Loma Larga ubicado en la provincia de Azuay, y posteriormente, la propuesta de una planta piloto usando simulación con MODSIM. En esta, indican el proceso de beneficio con el fin de homogenizar las propiedades de las arcillas y que éstas puedan ser usadas en diversos procesos industriales (Aviles & Ortega, 2017) .

Velín (2014), realizó en Piñas, provincia de El Oro, el mejoramiento y simulación de una planta de recuperación de oro con capacidad de 24 t/d por concentración gravimétrica, flotación y lixiviación. Las simulaciones fueron realizadas con MODSIM con el fin de determinar las mejores condiciones para el tratamiento del mineral en la planta (Velín, 2014).

Bustamante, realizó una publicación sobre simulación de plantas de procesamientos de minerales empleando MODSIM, con dos escenarios en la industria minera. La simulación para la recuperación de arcillas caoliníticas y la de lavado de carbones térmicos (Moises Bustamante, 2016).

1.1 Descripción del problema

SOMILOR SA actualmente procesa 73.000 toneladas de mineral aurífero al año. Sin embargo, una ampliación de la planta que se realizó basándose en conocimientos empíricos, ocasionó una selección no asertiva en el dimensionamiento de ciertos equipos de conminución, además de sobrecarga o carga inferior en medios moledores, altos tiempos de reincidencia que influyen directamente en el consumo de energía eléctrica; y, desgaste de los mismos.

Al no tener control de estas variables, existe la falta de eficiencia en las áreas de trituración, molienda y flotación, repercutiendo además en la recuperación de metales de interés económico.

1.2 Justificación del problema

En la planta SOMILOR se requiere alcanzar mayor eficiencia de los procesos operativos que tratan metales de interés como oro, plata, cobre y hierro a un nivel de producción de 200 t/d. Para esto, se necesita de un diseño optimizado que permita conseguir porcentajes de recuperación más altos en procesos selectivos, como flotación por espumas.

Al plantear los procesos minero-metalúrgicos, el personal técnico determina el tamaño óptimo de molienda mediante ensayos cinéticos a escala de laboratorio. Estos ensayos de laboratorio no se pueden realizar con suficiente rapidez para dar respuesta a las demandas de producción y requerimientos económicos de la planta; y, además no permiten predecir los cambios en el régimen permanente de la planta.

Se propone como alternativa rápida de análisis, la modelización de la planta en la aplicación MODSIM, que permitiría estimar el nuevo equilibrio en régimen permanente que se produciría, tras la modificación de los parámetros del tamaño de molienda, y, de igual forma, la representación económica de los cambios en los procesos que deseen realizar. El esquema en conjunto permitiría conocer si existe un incremento en la producción, bajo los parámetros de operación con los que se pretende trabajar.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Optimizar la producción de la planta SOMILOR S.A. mediante un modelo técnico-económico para estimar las variaciones producidas en la planta real ante modificaciones de diferentes parámetros operativos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Los objetivos de este proyecto son:

1. Identificar los principales parámetros operativos de entrada y salida de los equipos de la planta, mediante levantamiento de datos en campo.

2. Modelar las operaciones unitarias que integran el diagrama de flujo de la planta, mediante la digitalización en el software MODSIM del diagrama de flujo de la planta SOMILOR S.A.
3. Evaluar las modificaciones que se producirían en la planta ante variaciones de parámetros operativos, mediante el uso del simulador.
4. Analizar los costes CAPEX y OPEX, mediante un análisis de sensibilidad de la inversión.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Ubicación geográfica

SOMILOR S.A. está ubicada al Sur del Ecuador, en la provincia del Azuay, cantón Camilo Ponce Enríquez, sector la López, como lo indica en la Figura 1.1. Actualmente, mantiene una planta de beneficio donde sus etapas de producción constan de la conminución, flotación, lixiviación, electrodeposición y fundición. Adicionalmente, SOMILOR S.A. cuenta con un tratamiento para el agua utilizada en el proceso.



Figura 1.1 Ubicación geográfica SOMILOR S.A.

Fuente: Mapa geográfico Ecuador

1.4.2 Mineralización

El mineral que se procesa pertenece a un yacimiento polimetálico de complejos sulfurados, con una mineralización de vetas auríferas formadas por relleno de fracturas de potencia variable entre 5 a 60 cm, relacionadas con intrusiones y alojadas en rocas volcánicas efusivas andesíticas.

Los componentes básicos para este mineral se identifican en cuatro grupos, que se enumeran a continuación en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1 Mineralización

Roca	
Cuarzo	SiO ₂
Calcita	CaCO ₃
Limonita	Fe ₂ O ₃ nH ₂ O
Sulfuros	
Piritas	FeS ₂
Calcopirita	CuFeS ₂
Arsenopirita	FeAsS
Esfalerita	ZnS
Galena	PbS
Oxidos	
Hematita	Fe ₂ O ₃
Magnetita	Fe ₃ O ₄
Metales Nobles	
Oro	Au
Electrum	AuAg
Calaverita	AuTe ₂
Argentita	Ag ₂ S

Fuente: autores

1.4.3 Descripción del proceso

1.4.3.1 *Explotación de la Mena*

El Método de explotación en la mina corresponde a corte y relleno. Para las operaciones en el proceso de minado intervienen las labores de perforación, voladura, ventilación, saneo, carguío, desalojo en rieles de manera mecanizada y en chimeneas, dependiendo de la inclinación.

1.4.3.2 Transporte de roca

Desde el interior de la mina, el material es desalojado desde los diversos frentes de explotación, empujados por palas cargadoras para el llenado de buzones. La carga es distribuida en los vagones que circulan en los subniveles que son remolcados por locomotora eléctrica, hasta un centro de acopio donde luego es levantada por un guinche hasta el nivel principal.

El mineral de veta y parte de la ganga es evacuado por otro grupo de 10 vagones como se indica en la Figura 1.2., hasta la superficie y depositado en las tolvas de mineral grueso. Parte del mineral de la ganga es dejado en el interior de la mina para relleno.



Figura 1.2 Locomotora y vagones

Fuente: Autores

1.4.3.3 Acopio

El mineral que es retirado desde el interior de la mina es arrojado en centros de acopio y clasificados según su tipo de interés económico. Para la mena, los acopios son denominados “tolvas de mineral grueso”, y para la ganga nombrados como “botaderos”.

El grupo de vagones empujados por una locomotora deja caer el mineral de veta sobre las tolvas de 180 t, que consta de una parrilla con abertura de 20 cm para evitar el paso de roca de tamaño excesivo. Las fracciones que cumplan con la dimensión adecuada continúan a la etapa de conminución. Asimismo, un grupo de vagones depositan la ganga sobre el nivel superior de una pendiente; y, en el nivel inferior, la ganga es cargada con excavadora y transportada con volquetas para ser aprovechada en trabajos de relleno y relaveras.

1.4.3.4 Conminución

Término que se utiliza para indicar la reducción de tamaño de grano de un material y que se aplica sin importar el mecanismo de fractura. Es el proceso que involucra las etapas de trituración y molienda para el aprovechamiento de minerales valiosos. Entre los equipos de operación para la etapa de trituración constan una serie de trituradoras de mandíbulas, cónicas, de impacto. Asimismo, las etapas de molienda cuentan con molinos de bolas, barras, etc. Se detalla el proceso de trituración y molienda en el APÉNDICE A y APÉNDICE B respectivamente. Los diagramas de flujo se muestran en los APÉNDICE C y APÉNDICE D.

1.4.3.5 Área de trituración primaria

Es la primera etapa de reducción de tamaño del mineral tal cual como llega de la mina. El tamaño inicial depende del tipo de minado, acarreo, transporte y de la escala de la explotación. De él depende a su vez, el dimensionamiento y el diseño para los equipos de triturado.

Los equipos utilizados son: una zaranda con dimensiones de 1.22 m de ancho y 2.44 m de largo, en la parte superior con abertura de 50.80 mm y en la inferior con 19.05 mm como se muestra en la Figura 1.3. Además, una trituradora de mandíbulas con capacidad de 16 a 64 t/h como en la Figura 1.4.



Figura 1.3 Zaranda vibratoria con dos pisos de malla

Fuente: (DISMET, 2017)

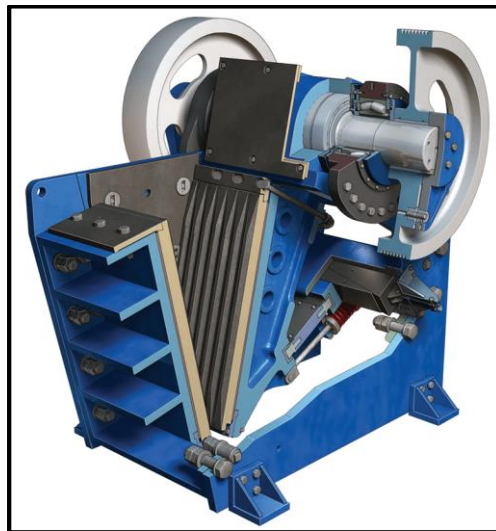


Figura 1.4 Trituradora de mandíbulas

Fuente: (INDIAMART, 2018)

La trituradora de mandíbulas consta de una cámara de triturado, donde una mandíbula móvil es impulsada por un mecanismo excéntrico, que ejerce una presión elevada sobre los trozos de mineral, hasta exceder su límite de ruptura (los trozos de mineral se trituran en realidad, según grietas preexistentes), alcanzando un tamaño inferior a 38.10 mm.

1.4.3.6 Área de trituración secundaria

Es la segunda etapa de reducción de tamaño del mineral, donde se recibe el material triturado de la trituradora de mandíbulas, para continuar con la rebaja de tamaño.

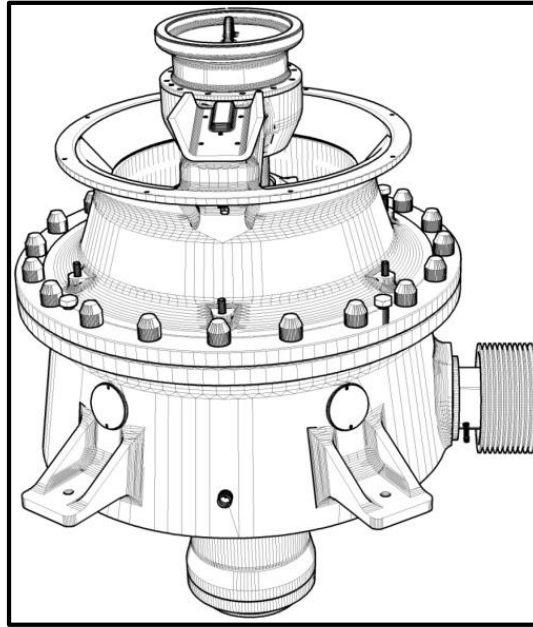


Figura 1.5 Trituradora de cono

Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento PYY Serie de Trituradora de Cono

El equipo aquí instalado es una trituradora cónica modelo PYY100 con capacidad de 45 t/h como se indica en la Figura 1.5. En esta, se pasa el material en circuito cerrado para apoyarse de una zaranda de alta frecuencia, que tiene dimensiones de 1.22 m en ancho y largo, con abertura de malla de 15.88 mm, hasta alcanzar el tamaño óptimo de alimentación al molino de bolas mostrado en la Figura 1.6. La exigencia del mineral para cumplir una molienda fina debe tener un tamaño no superior a 12.70 mm a fin de ser acumulado en una tolva de finos.



Figura 1.6 Zaranda de alta frecuencia

Fuente: Manual ASTEC

1.4.3.7 Área de molienda

La tercera y última etapa de conminución es la molienda, que consiste en la reducción del tamaño de las partículas hasta alcanzar la granulometría óptima para la liberación de la mayor parte de los minerales metálicos en forma de partículas individuales recuperables en la flotación por espumas.

El proceso consta de un molino de bolas de 1.83 m de diámetro por 3.66 m de largo indicado en la Figura 1.7 y cuya capacidad de operación es de 180 ~ 200 t/d.

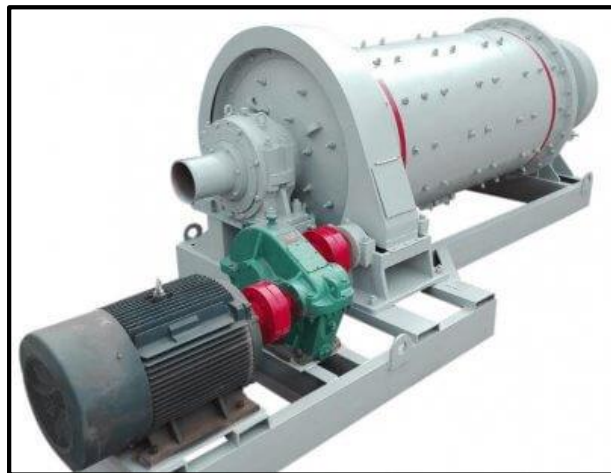


Figura 1.7 Molino de bolas
Fuente: (Metallurgist, 2012)

1.4.3.8 Hidrociclones

El molino trabaja en conjunto con una bomba de pulpa que sirve para enviar el flujo tangencialmente (descarga del molino) hacia un equipo continuo denominado Hidrociclón (Figura 1.8) donde su cámara cilíndrica se encarga de realizar una clasificación entre partículas.

La parte superior contiene un tubo “vórtex” para la salida de las partículas finas (overflow) que se dirigen a una malla DSM y posteriormente a la etapa de flotación por espumas.

En la parte inferior porta un orificio llamado “ápex” para la salida de las partículas gruesas (underflow) que retornan al molino. El producto final alcanza un tamaño de 65 ~ 70 % bajo malla #200 al momento de alimentar al circuito de flotación. La malla #200 representan un tamaño de 75 μm .

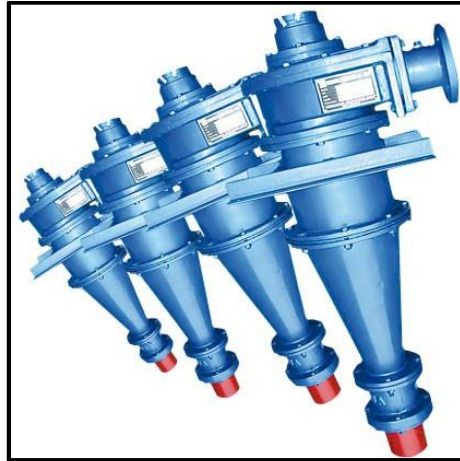


Figura 1.8 Hidrociclones
Fuente: (ICBA, 2015)

1.4.3.9 Área de flotación

La flotación se define como un proceso físico - químico mediante el cual se produce la separación de los metales y sulfuros del resto de los minerales y especies que componen la mayor parte de la roca original. La flotación de los distintos minerales se basa en las propiedades hidrofílicas o afinidad por el agua e hidrofóbicas o afinidad por el aire, de cada especie mineral de interés que se requiere separar de otras especies sin valor comercial.

Este proceso de concentración contempla la presencia de tres fases: sólido, líquida y gaseosa. La fase sólida representa las materias a separar, la fase líquida es el medio donde se realiza la separación y la fase gaseosa es el medio de transporte del mineral de interés (Seongsoo Han, 2021).

Se inyecta aire a la pulpa en movimiento para formar burbujas que arrastran consigo hacia la superficie los minerales sulfurados, y donde rebasan a una canaleta que las conduce a celdas continuas. En el

APÉNDICE E se muestra el diagrama de flujo del área de flotación con el espesamiento de relaves y recirculación de agua.

El volumen promedio de pulpa que circula por este proceso corresponde a 12 m³/h, con un sólido promedio de 28 ~ 30%, más la adición de reactivos colectores y espumantes. El proceso se encuentra conformado por tres etapas: rougher, scavenger y cleaner.

El rougher logra altas recuperaciones de partículas valiosas eliminando parte de la ganga, obteniendo un “concentrado” que no es considerado como final que pasa a la etapa de limpieza o cleaner, y una “cola” que es alimentación para la etapa “scavenger”.

El cleaner logra concentrar el producto proveniente del rougher para conseguir concentrados finales de alta ley mejorando la selectividad de partículas valiosas. Las colas de esta etapa son retornadas al acondicionamiento de pulpa.

El scavenger recibe las colas del rougher para recuperar la mayor cantidad de material valioso que no pudo ser concentrado en un principio. El concentrado obtenido en esta etapa se dirige al cleaner para enriquecer el producto y el material que no logró flotar se considera como cola final.

En el APÉNDICE F se indica el circuito que se encuentra formado por una celda acondicionador, una celda rougher, una celda cleaner y seis celdas scavenger. En el acondicionamiento de pulpa se agregan los colectores y espumantes. La pulpa concentrada será enviada a la siguiente etapa del proceso metalúrgico, que corresponde a la lixiviación del oro en solución acuosa de cianuro.

1.4.3.10 *Área de Espesamiento de Relave*

Se denomina espesamiento a la operación de separar mediante el mecanismo de sedimentación, de modo que se obtiene, por una parte, una pulpa de mayor

concentración de sólidos en la descarga (underflow), y por la otra, un flujo de agua clara (overflow).

El equipo mecánico llamado “espesador” como se indica en la Figura 1.9, usa un rastrillo que cubre casi en su totalidad el diámetro del tanque permitiendo el movimiento y evacuación de la pulpa ya espesada. El giro es muy lento procurando no elevar los finos ya sedimentados, y el porcentaje de sólidos en la descarga de pulpa depende de las características que necesita la pulpa a ser depositada en la relavera. La capacidad del espesador abarca 130 m³.

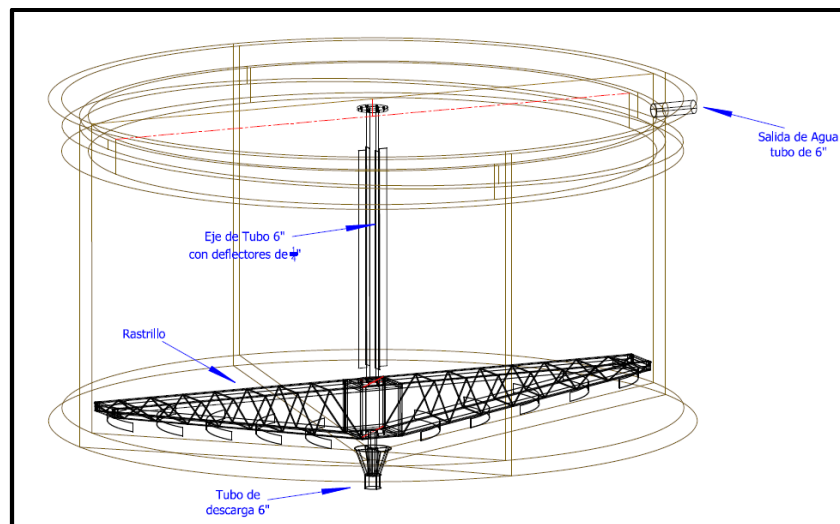


Figura 1.9 Espesador

Fuente: Autores

1.4.3.11 Recirculación del Agua

Las aguas resultantes de la conminución y flotación son conducidas a tanques de decantación (cisternas), las mismas que están ubicados a un nivel inferior de las áreas de estos procesos, y por medio de bombas las aguas son retornadas a los mismos procesos para mantener una recirculación que corresponde a un 60% a 70% de toda el agua empleada.

1.4.3.12 Área de lixiviación de oro

Este proceso hidrometalúrgico de recuperación de oro se basa en el principio de la disolución del metal mediante soluciones alcalinas cianuradas en presencia de oxígeno. En la superficie expuesta y fresca del mineral de oro, la

solución acuosa de cianuro empieza actuar y a disolver el metal formando complejos AuCN^- de gran estabilidad.

Dependiendo de la refractariedad del mineral, en esta etapa se alcanza un alto porcentaje en la recuperación del metal. La lixiviación se efectúa en tanques agitadores, que son equipos de accionamiento electromecánico cuya función es batir la pulpa con insuflado de aire, acelerando la cinética del proceso.

La operación de lixiviación corresponde a un ejercicio individual de cada tanque, es decir una operación tipo batch. En un tiempo no mayor a 14 horas el mineral concentrado está lixiviado, obteniendo al final una solución rica cargada de iones del metal oro para una electrodeposición posterior, además, se adquiere solución estéril que circula por columnas de carbón. El material sólido en los tanques agitadores son relaves finales que contienen una ley comerciable, por lo que son enviados a un galpón con piscinas para deshidratación y luego a exportación.

En el APÉNDICE G se muestra el diagrama de flujo del área de lixiviación con los procesos de electrodeposición, columnas de carbón, elución y embarque de concentrado de oro para exportación. Para mejor comprensión de los procesos involucrados, se adjunta un flujograma de la planta de beneficio SOMILOR S.A. en el APÉNDICE H.

1.4.4 Software

MODSIM es el acrónimo de MODULAR SIMULATION (Mineral Technologies International, 1978) con versión 3.6 Figura 1.10, siendo un software de simulación para plantas en procesamiento de minerales, que comprende temas relacionados a balances de masa, reducción de tamaño de grano, clasificación según su tamaño, estado sólido – líquido y composición mineralógica. Además, permite añadir o quitar equipos que puedan ajustarse bajo las condiciones de la planta, y modificar parámetros de los equipos involucrados en los diseños propuestos.

MODSIM se convirtió en la herramienta principal para el desarrollo de esta investigación, facilitando la elaboración del diagrama de flujo mediante el editor gráfico que mantiene incorporado. Con este programa se pudo realizar una simulación de las principales áreas de producción en planta: trituración, molienda y flotación, todas en régimen permanente. Las simulaciones no abarcan demás procesos que se encuentran involucrados en su línea principal de producción por lo que se advierte que este proyecto mantiene esa limitación. En el APÉNDICE I se describen las funciones del menú principal.

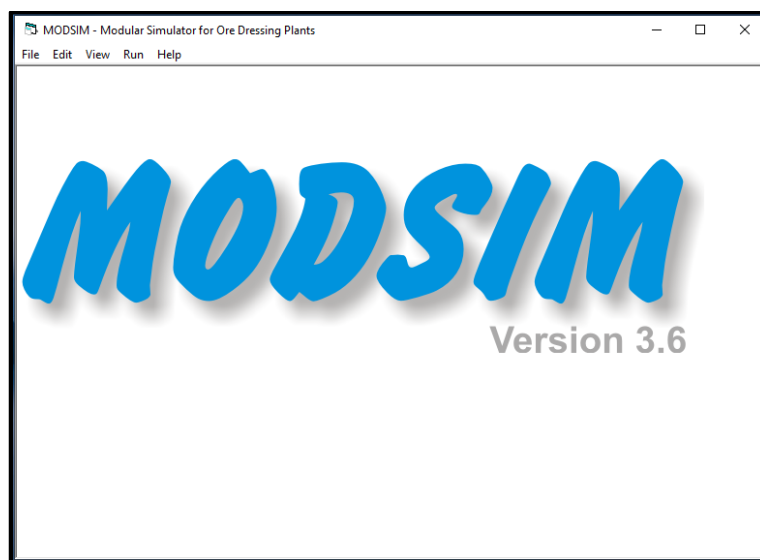


Figura 1.10 Ventana principal MODSIM

Fuente: Manual MODSIM

1.4.5 Evaluación económica

La identificación de los equipos principales que son usados en el desarrollo de las actividades mineras en SOMILOR S.A. son la base para realizar los cálculos pertinentes en la estimación de costos de capital y costos de operación.

1.4.5.1 Costo de equipos principales

Se incluyen los siguientes equipos principales de la planta de beneficio: zaranda de doble piso de malla, trituradora de mandíbula, zaranda de alta frecuencia, trituradora de cono, hidrociclón, molino de bolas, celdas de flotación.

Con el análisis económico se conoce el valor actual neto (VAN) y el valor de la tasa interna de retorno (TIR) que permitirán conocer si la planta es económicamente rentable (Barry A. Wills, 2006).

La planta ya se encuentra en operación, por ello se determina el impacto económico de un planteamiento versus a la operación real. Con estas metodologías se obtiene un criterio al momento de elegir qué propuesta es el más conveniente.

Para la estimación del costo de un equipo se considera: capacidad de procesamiento en t/h, complejidad del diseño, materiales, accesorios adicionales, naturaleza y complejidad de la cadena de accionamiento y el motor, etc.

1.4.5.2 Método de Índice de costos

Relación de los costos entre un tiempo determinado y un año base. Los índices de costos empleados comúnmente en las industrias de procesos son:

- Índice de construcción del ENR (Engineering News-Record)
- Índice de costos de Marshall and Swift
- Índice de costos de construcción de plantas de Chemical Engineering.
- Índice de costos de construcción de Nelson Refinery (NR).

Índice de construcción del ENR (Engineering New-Record): Se basa en los costos de mano de obra y materiales de construcción. Su año base es 1.913 (ENR, 1874).

Índice de costos de construcción de plantas de ingeniería química: Se basa en los costos de equipo, montaje e instalación, materiales, mano de obra, ingeniería y supervisión (L. Pintelon, 1997).

Índice de costos de construcción de la refinería de Nelson (NR): Se basa en material y mano de obra (Instituto Tecnológico Geominero de España, 1991).

Índice de costos de Marshall and Swift: Los índices M&S se basan en evaluaciones de los equipos y juicio sobre las condiciones económicas actuales como la inflación (Instituto Tecnológico Geominero de España, 1991). Son compilados cada tres meses por Marshall y Swift en EE. UU.

Para las plantas de procesos en minería, el índice empleado es el M&M (Mine&Mill) siendo su año base 1.926. Este índice de costos también se emplea en la actualización de precios de los equipos que se ajustan a un valor común de 1400 (Andrew Mular, 1998). El método de índices de costos aplica la ecuación (1.1).

$$(\text{costo})1.400 = a[x]^b, \$ \quad (1.1)$$

Las estimaciones de mínimos cuadrados no lineales de los parámetros a y b para elementos de equipos se muestran con los gráficos correspondientes en el libro CAPCOSTS.

En caso de que los costos de aduana sean de aplicación, se puede estimar con el 15% del valor del equipo. Para las plantas de beneficio, el traslado del equipo representa un 3% adicional y su instalación un 39% que corresponden a trabajos de electricidad, agua y protecciones de seguridad.

1.4.5.3 *Estimación de costos de capital*

La estimación del costo de capital es importante en todas las etapas de ingeniería de un proyecto minero, donde las decisiones deben estar respaldadas por análisis financieros. La inversión de capital total en una planta de beneficio consiste en una parte de capital fijo y una parte de capital de trabajo.

El capital fijo es la cantidad total de dinero necesaria para comprar el equipo, los edificios y los auxiliares necesarios, como la preparación del sitio, el desarrollo de la preproducción y los servicios públicos. El capital de trabajo representa el efectivo que debe estar disponible para comenzar la operación (Lama, 2018).

Los costos totales incluyen operativos como costos directos de producción, cargos fijos y gastos generales de planta. Los gastos generales abarcan costos administrativos, de distribución, comercialización, investigación y desarrollo (Raúl, 2017).

La asociación estadounidense de ingeniería de costos ha propuesto cinco tipos principales de estimaciones de capital fijo (Association for the Advancement of Cost Engineering, 1956).

- Estimación del orden de magnitud basada en datos de costos previos y conocimientos mínimos. Es una estimación de razón con límites de confianza que superan el 30%.
- Estimación (preliminar) de autorización presupuestaria basada en datos suficientes para permitir la adquisición de fondos y la presupuestación. La precisión se encuentra dentro del 10%.
- Estimación definitiva (control del proyecto) basada en datos casi completos, la precisión probable está dentro del 10%.
- Estimación detallada (contratistas) basada en planos de ingeniería completos, especificaciones y estudios del sitio La precisión probable es del 15%.
- Estimación factorizada o de razón basada en los costos de los equipos principales con una precisión probable dentro del 30%.

El presente proyecto trabaja con la última alternativa, basada en los costos de equipos principales, ya que el resto de las opciones implican un prologando tiempo de investigación (Andrew Mular, 1998). Para esto se incluye los valores

de costos de equipos adquiridos, tuberías utilizadas en los procesos, instrumentación, edificios, suministros de agua, depósitos de relaves, líneas exteriores, costo de planta física, ingeniería y construcción, contingencias, factor de escala, costo de capital fijo, costo de trabajo y capital total de inversión.

1.4.5.4 *Análisis de sensibilidad*

El análisis permite examinar los efectos de las variaciones en los parámetros del proyecto sobre los criterios de decisiones en inversión (Sebastián, 2013). La rentabilidad de una operación minera está directamente influenciada por variaciones en los parámetros de costos, ingresos, recuperación y por sus variaciones económicas y financieras.

Se establece un caso base utilizando los valores más probables para cada variable en el análisis de valor actual neto, luego calculando un rango de posibles VAN probando en qué medida las variables individuales influyen en el atractivo económico de una inversión (Jerez Daniel, 2016).

Generalmente se realiza una serie de cálculos utilizando varios valores de la variable en consideración, mientras se mantiene constante todas las demás variables. Es la forma más simple de que un análisis de sensibilidad examine el efecto de una variable a la vez.

Al variar un parámetro particular en un rango de valores como por ejemplo el caso del presente estudio -8%, -4%, +4% y +8% de su estimación más probable, se obtiene un rango de valores de rentabilidad para el proyecto. Al analizar todos los parámetros de esta manera, el análisis de sensibilidad permite a los involucrados definir parámetros bajo criterios de decisión más sensibles.

Los resultados del análisis de sensibilidad son presentados en forma gráfica, por medio de diagrama de araña, como se muestra en la Figura 1.11. Los cambios relativos en factores particulares se grafican contra cambios relativos

en la rentabilidad de un proyecto. La pendiente de cada una de las curvas expresa la sensibilidad relativa al factor como la vida del proyecto. La sensibilidad se usa para responder preguntas de “que pasaría si”.

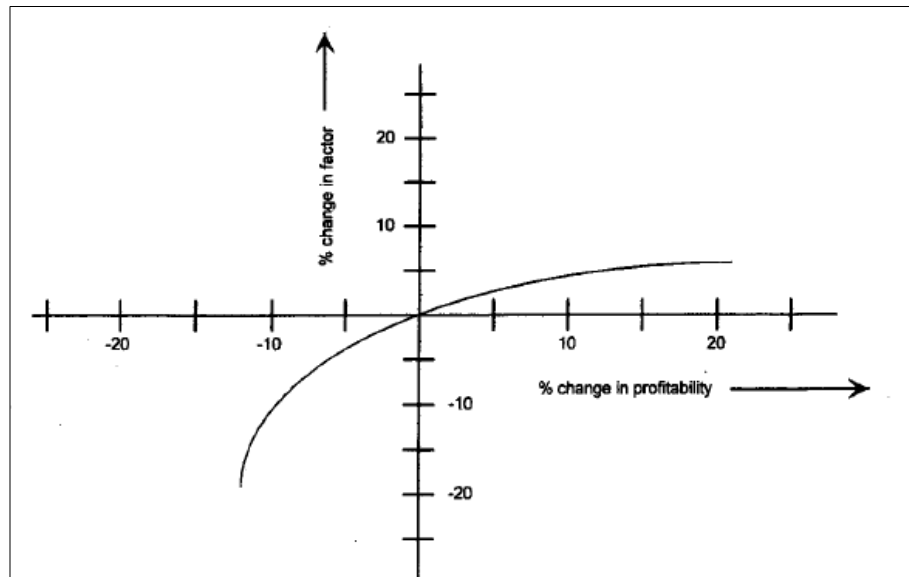


Figura 1.11 Diagrama de araña asociado con el análisis de sensibilidad

Fuente: (Andrew Mular, 1998)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

SOMILOR S.A. realizó una ampliación de su planta de beneficio que actualmente se encuentra en operación, para esto, se determinó la presente metodología que permite obtener un criterio previo en el campo operacional y económico para la selección de equipos principales. Se simularon los procesos de trituración, molienda y flotación separados en tres secciones.

2.1 Simulación técnica

2.1.1 Diagrama de flujo

Para la construcción del diagrama de flujo en MODSIM, se tomó en cuenta equipos que fueron determinantes por su contenido de parámetros operativos que se requieren para la simulación, por ejemplo: trituradoras, zarandas, molino de bolas, hidrociclón y celdas de flotación. No se involucra unidades como tolvas, bandas transportadoras, imanes y bombas de pulpa.

Por cada uno de los equipos se tomó datos específicos que el software requiere para su simulación. En ambas trituradoras, el parámetro determinante fue el tamaño de entrada y salida de mineral; para las zarandas fueron las dimensiones de sus mallas; en el molino de bolas se tomó la rotura en función del tipo de mineral e hidrociclón con sus dimensiones; por último, las celdas de flotación sus dimensiones, altura de espumas y porcentaje de sólidos.

Se dividió el proceso de la planta en tres secciones para tener mayor facilidad en la construcción de diagramas de flujo e ingreso de parámetros para cada uno de los equipos. El proceso de lixiviación, columnas de carbón y electrodeposición no se incluye en el proyecto debido a que el software mantiene limitaciones con estas áreas. Las tres secciones son: trituración, molienda y flotación.

2.1.2 Sección 1: Trituración

Desde el menú “edit” y posterior “select”, se incorporó la lista de equipos que se detallan en la Tabla 2.1. Luego las unidades fueron acopladas con líneas de flujo con la finalidad que el software enlace sus productos de entrada y salida.

Tabla 2.1 Unidades de Sección 1 en MODSIM

N°	Unidades Sección 1	Unidades en MODSIM
1	Zaranda de doble piso de malla	Double - deck screen
2	Trituradora de Mandíbulas	Jaw crusher
3	Zaranda de alta frecuencia	Cone crusher
4	Trituradora de Cono	Single - deck screen
5	Bandas para recirculación de mineral	Mixer

Fuente: Autores

Adicionalmente, con la opción “Add stream flyout”, se colocó cuadros de representación para las unidades de salida como se muestra en la Figura 2.1. Se pulsa “Accept flowsheet” y se guardó el trabajo como TRITURACIÓN.

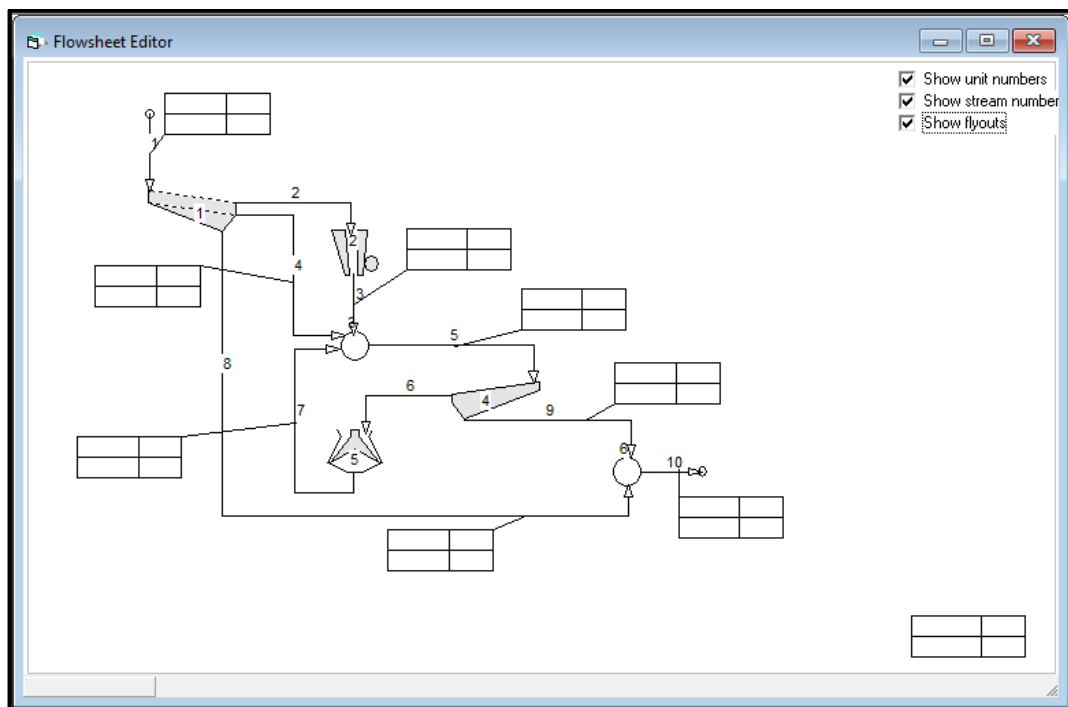


Figura 2.1 Diagrama de flujo Sección 1

Fuente: Autores

2.1.2.1 *Entrada de datos de los equipos al sistema*

Desde el menú “Edit” se procedió a ingresar los datos de alimentación al sistema con “edit system data”, abriéndose una ventana nueva para insertar: número de minerales tomado como una sola masa, gravedad específica 2.70 g/cm³, tamaño máximo de partícula 350 mm como se indica en la Figura 2.2.

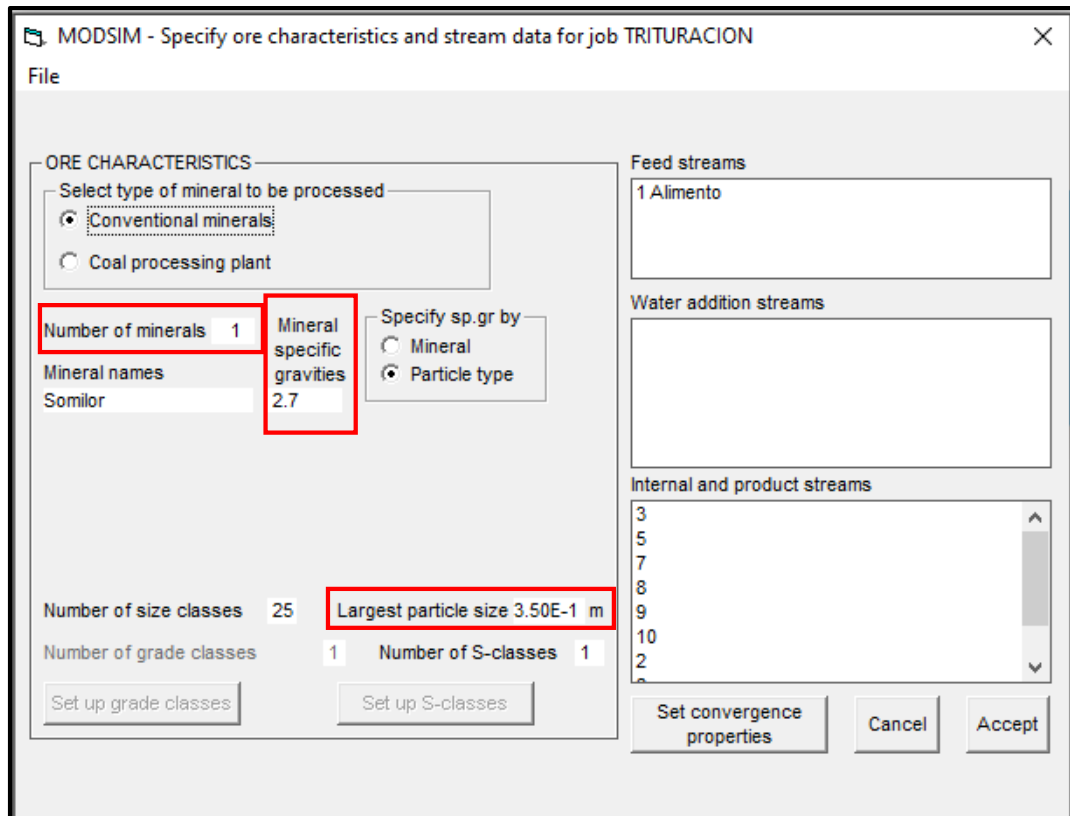


Figura 2.2 Entrada de datos al sistema Sección 1

Fuente: Autores

Asimismo, desde el menú “Edit” se proporcionó a ingresar las especificaciones de los equipos de la sección 1. Se escogió un modelo dependiendo de la información que se logró recoger por cada unidad. Al pulsar “edit unit model parameters”, se presenta las especificaciones de:

2.1.2.2 *Zaranda de doble piso de malla*

Las características de la zaranda de doble piso de malla se presentan en la Tabla 2.2. En MODSIM se escogió el modelo DSC1 y se procedió a ingresar las dimensiones del equipo como se indica en la Figura 2.3.

Tabla 2.2 Especificaciones Zaranda doble piso de malla

Zaranda de doble piso de malla		
Descripción	mm	ft
Ancho malla	1219.2	4.00
Largo malla	2438.4	8.00
Malla superior	50.8	0.17
Malla inferior	19.1	0.06

Fuente: Autores

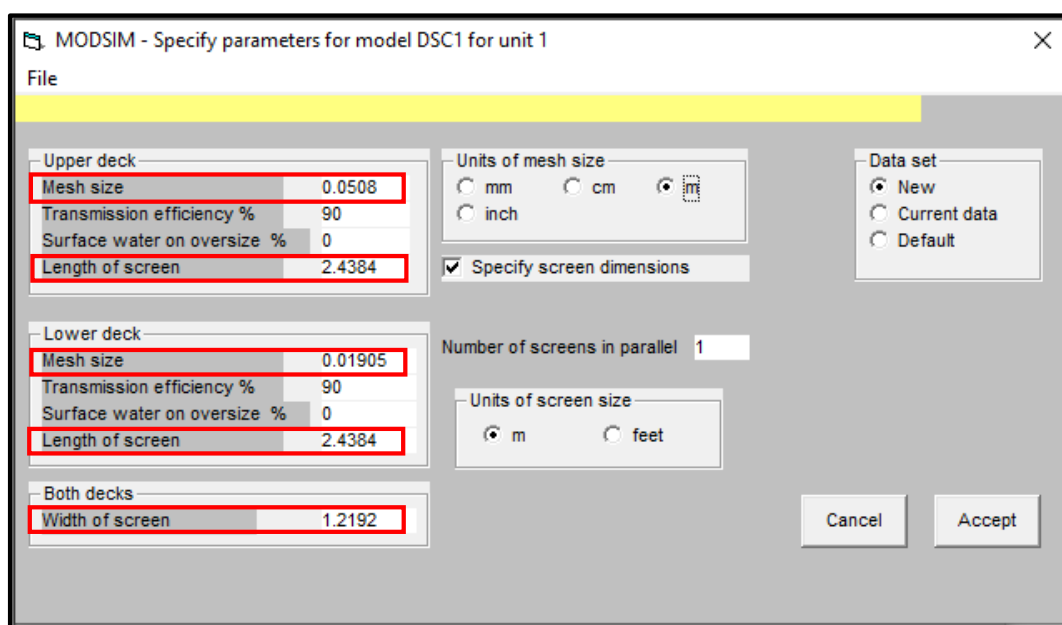


Figura 2.3 Modelo DCS1 Zaranda de doble piso de malla

Fuente: Autores

2.1.2.3 Trituradora de mandíbulas

El tamaño del producto de entrada y salida de la trituradora de mandíbulas se presentan en la Tabla 2.3. En MODSIM se seleccionó el modelo Jaw1 y se procedió a ingresar los parámetros del equipo como se indica en la Figura 2.4.

Tabla 2.3 Especificaciones Trituradora de mandíbulas

Unidad/Equipo	Trituradora de mandíbulas
Tamaño producto entrada	50.80 mm
Tamaño producto salida	38.10 mm

Fuente: Autores

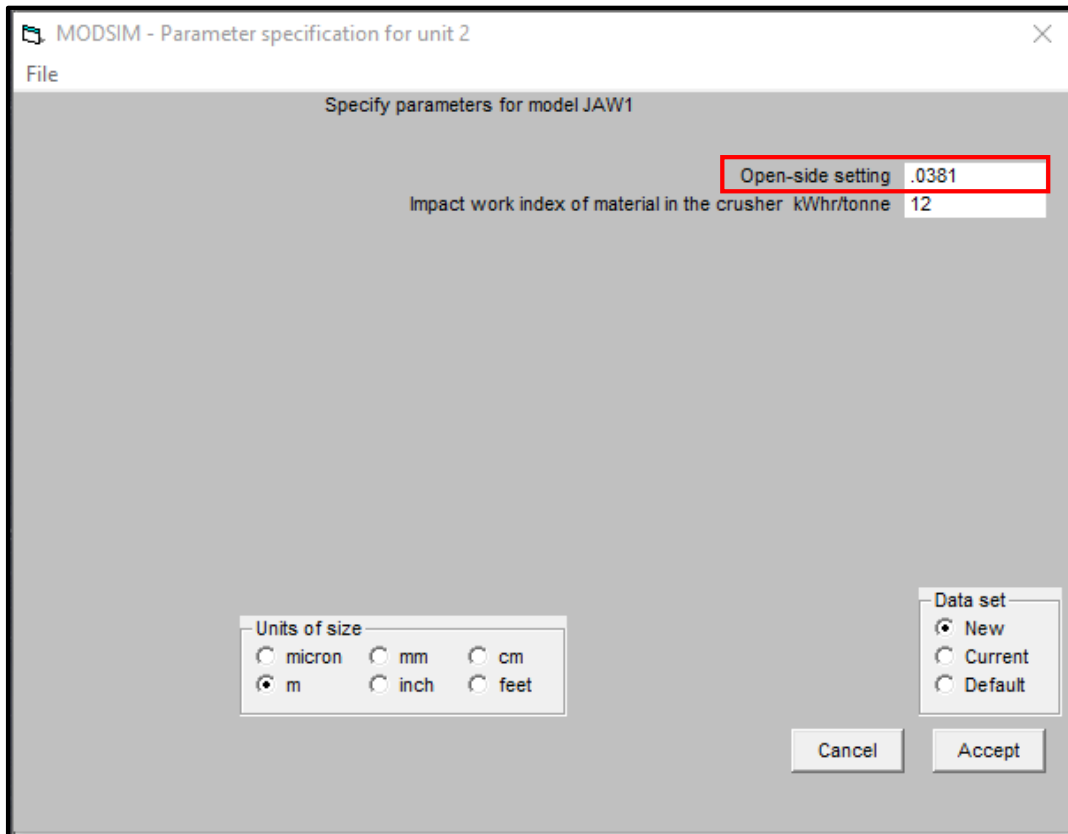


Figura 2.4 Modelo Jaw1 Trituradora de mandíbulas

Fuente: Autores

2.1.2.4 Zaranda de alta frecuencia

Las características de la zaranda de alta frecuencia se presentan en la Tabla 2.4. En MODSIM se escogió el modelo SCR N y se procedió a ingresar las dimensiones del equipo como se indica en la Figura 2.5.

Tabla 2.4 Especificaciones Zaranda alta frecuencia

Zaranda de alta frecuencia		
Descripción	mm	ft
Ancho malla	1219.20	4.00
Largo malla	1219.20	4.00
Malla	15.88	0.05

Fuente: Autores

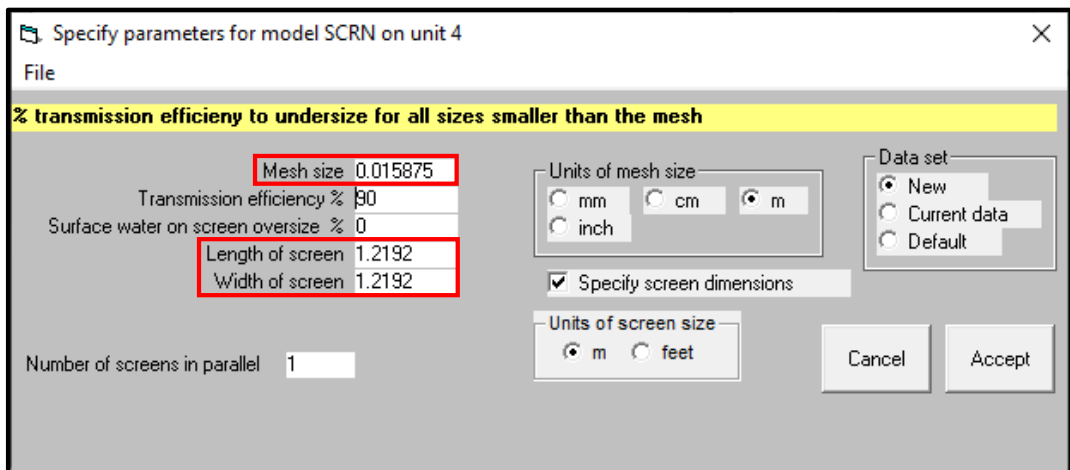


Figura 2.5 Modelo SCRN de Zaranda de alta frecuencia
Fuente: Autores

2.1.2.5 Trituradora de cono

El tamaño del producto de entrada y salida de la trituradora de cono se presentan en la Tabla 2.5. En MODSIM se seleccionó el modelo CRS1 y se procedió a ingresar los parámetros del equipo como se indica en la Figura 2.6.

Tabla 2.5 Especificaciones Trituradora de cono

Unidad/Equipo	Trituradora de cono
Tamaño producto entrada	15.88 mm
Tamaño producto salida	12.70 mm

Fuente: Autores

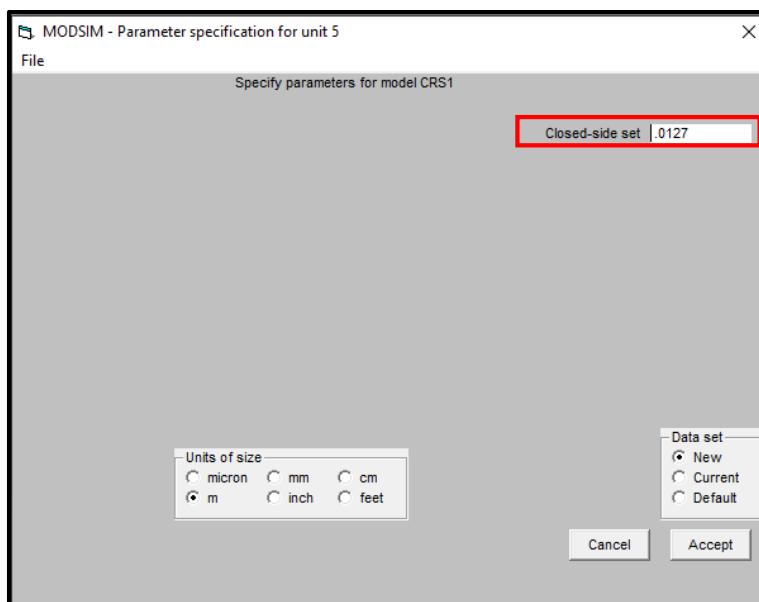


Figura 2.6 Modelo CSR1 Trituradora de cono
Fuente: Autores

2.1.2.6 Simulación

Una vez que se terminó de agregar los parámetros necesarios para cada uno de los equipos, se procedió a correr la simulación con “Run simulation”. Para visualizar el trabajo culminado, el menú “View flowsheet” permite verificar el trabajo con sus unidades respectivas de salida “t/h”.

2.1.3 Sección 2: Molienda

Asimismo, como se realizó la sección 1, en el menú “edit” y posterior “select” se incorporaron los equipos enlistados en la Tabla 2.6. Se incluyeron dos unidades mixers a la entrada y salida del molino con la finalidad de incluir agua para la dilución de pulpa. Las bandas transportadoras y bombas de pulpa no fueron tomadas en cuenta para la simulación.

Tabla 2.6 Unidades de Sección 2 en MODSIM

N°	Unidades Sección 1	Unidades en MODSIM
1	Agua a la entrada del molino	Mixer
2	Molino de bolas	Ball mill
3	Hidrociclón	Hydrocyclone
4	Agua al hidrociclón	Mixer

Fuente: Autores

Con la opción “Add water stream”, se incluyó el agua que se agrega al molino e hidrociclón. Asimismo se colocaron cuadros de representación con “Add stream flyout” para las unidades de salida como se muestra en la Figura 2.7. Se pulsa “Accept flowsheet” y se guardó el trabajo como MOLIENDA.

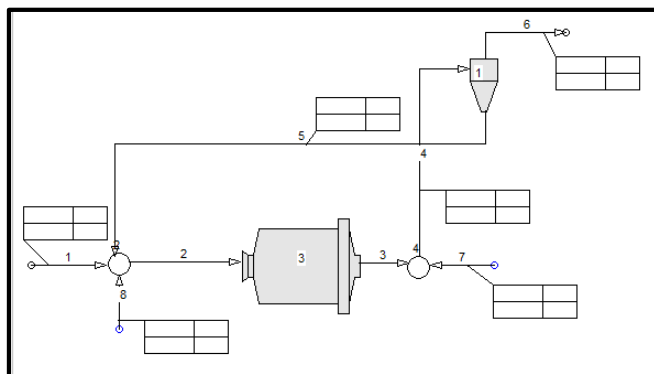


Figura 2.7 Diagrama de flujo Sección 2

Fuente: Autores

2.1.3.1 Entrada de datos de los equipos al sistema

Desde “Edit” y “edit system data” se ingresaron los datos de alimentación al sistema: el número de minerales tomado como una sola masa, gravedad específica 3.40 g/cm³ y tamaño de partícula máxima de 12.70 mm como se muestra en la Figura 2.8. El producto final de la etapa de trituración es el producto de alimentación de la etapa de molienda por lo que se copian los datos de la distribución de tamaño de partículas. Se adjuntan los datos de la granulometría en el APÉNDICE J.

MODSIM - Specify ore characteristics and stream data for job MOLIENDA

File

ORE CHARACTERISTICS

Select type of mineral to be processed

Conventional minerals

Coal processing plant

Number of minerals: 1

Mineral names: SOMILOR SA

Mineral specific gravities: 3.4

Specify sp.gr by

Mineral

Particle type

Number of size classes: 25

Largest particle size: 1.27E-2 m

Number of grade classes: 1

Number of S-classes: 1

Feed streams

1 Alimento

Water addition streams

7 Agua a ciclón

8 Agua a molino

Internal and product streams

2

3

4

5

6

Set up grade classes

Set up S-classes

Set convergence properties

Cancel

Accept

Figura 2.8 Entrada de datos al sistema Sección 2

Fuente: autores

Se incluyeron parámetros adicionales que influyen directamente en el circuito como el agua que ingresa al molino e hidrociclón. Se consideró para el hidrociclón un porcentaje de sólidos de 52 % y para el molino un 65 % como se indica en la Figura 2.9 y Figura 2.10 respectivamente.

The screenshot shows a dialog box titled "Specify water feeds" with a close button (X) in the top right corner. Below the title bar is a "File" section. A yellow highlighted box contains the text "Specify a descriptive name for the stream". Below this, "Stream: 7" is followed by a text input field containing "Agua a ciclon". To the right is a "Data set" section with three radio buttons: "New" (selected), "Current", and "Default". Below the stream name is a section titled "Specify water addition by" with two radio buttons: "Water addition rate" and "Percent solids in unit" (selected). At the bottom, a red-bordered box highlights the text "Percent solids in unit" followed by a small input field containing "4" and a larger input field containing "52". At the bottom right are "Cancel" and "Accept" buttons.

Figura 2.9 Parámetro Agua al hidrociclón

Fuente: Autores

The screenshot shows a dialog box titled "Specify water feeds" with a close button (X) in the top right corner. Below the title bar is a "File" section. A yellow highlighted box contains the text "Specify a descriptive name for the stream". Below this, "Stream: 8" is followed by a text input field containing "Agua a molino". To the right is a "Data set" section with three radio buttons: "New" (selected), "Current", and "Default". Below the stream name is a section titled "Specify water addition by" with two radio buttons: "Water addition rate" and "Percent solids in unit" (selected). At the bottom, a red-bordered box highlights the text "Percent solids in unit" followed by a small input field containing "2" and a larger input field containing "65". At the bottom right are "Cancel" and "Accept" buttons.

Figura 2.10 Parámetro Agua al molino

Fuente: Autores

Asimismo, como en la sección 1, desde el menú “Edit” se proporcionó a colocar las especificaciones de los equipos involucrados dependiendo de la información que se logró recoger en planta. Al pulsar “edit unit model parameters”, se presenta las especificaciones de:

2.1.3.2 Molino de bolas

El molino de bolas con dimensiones de 1.83 m de ancho y 3.66 m de largo, se tomó como modelo GMIL con selección de cuarcita debido a que la ganga se encuentra formando mayoritariamente por rocas andesíticas que tienen similitud a la misma. En la Figura 2.11 Modelo GMIL Molino de bolas se muestra la lista de minerales según su tipo de rotura.

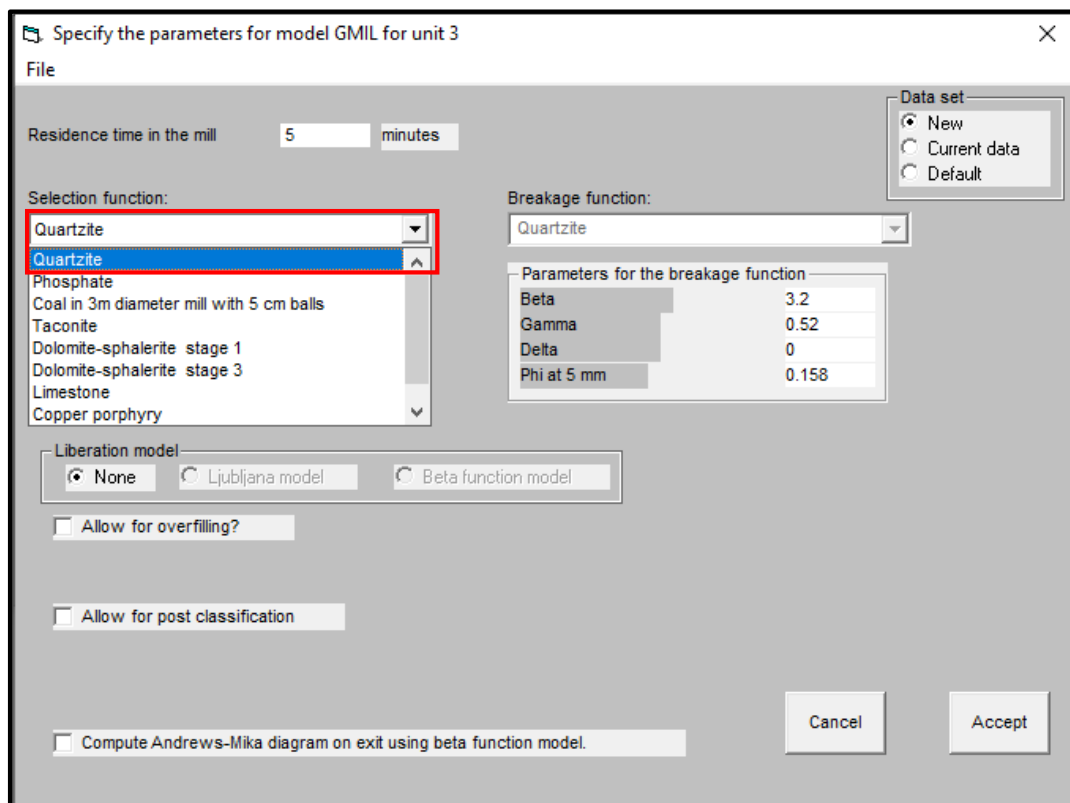


Figura 2.11 Modelo GMIL Molino de bolas

Fuente: Autores

2.1.3.3 Hidrociclón

Las características y dimensiones del hidrociclón HD10B se indican en la Tabla 2.7. En MODSIM se tomó como modelo CYCL y se procedió a ingresar los datos correspondientes como se indica en la Figura 2.12.

Tabla 2.7 Especificaciones Hidrociclón

Hidrociclón		
Descripción	m	in
Diámetro	0.25	10.00
Distancia entre vórtex – ápex	0.64	25.28
Vórtex	0.05	1.97
Ápex	0.03	1.18
Columna de agua	3.75	147.64

Fuente: Autores

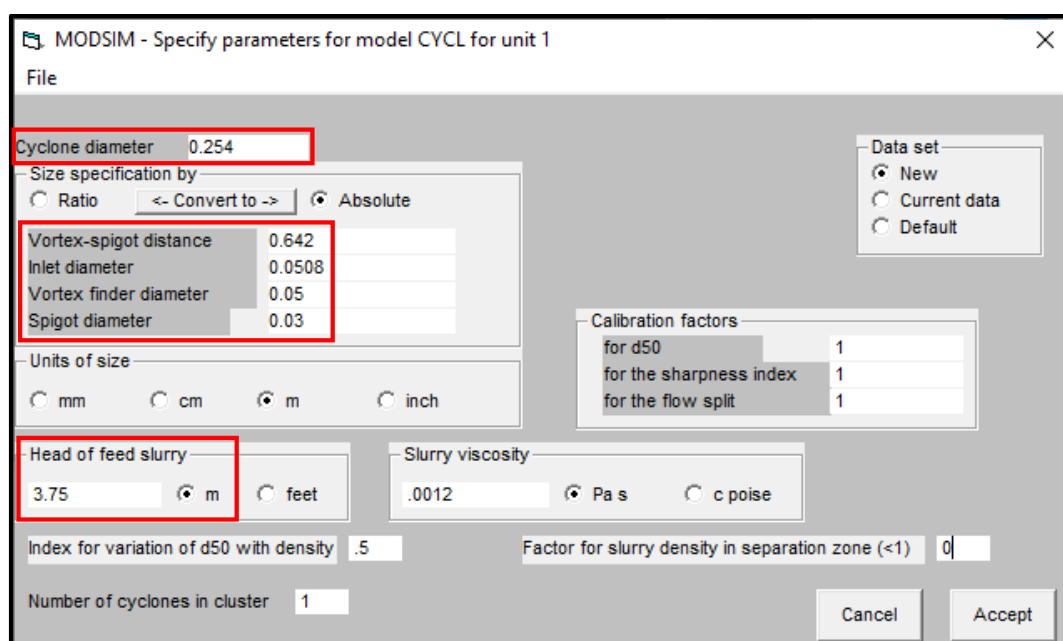


Figura 2.12 Modelo CYCL Hidrociclón

Fuente: Autores

2.1.3.4 Simulación

Se colocó las especificaciones que fueron tomadas en planta para el molino de bolas e hidrociclón y se procedió a realizar la simulación con “Run simulation”. El trabajo culminado se visualiza con “View flowsheet” con unidades en “t/h” y “l/min” para el agua.

2.1.4 Sección 3: Flotación

Se elaboró la sección 3 utilizando la misma secuencia de las secciones anteriores, iniciando con el menú “edit” y posterior “select”. Se seleccionó el ícono único que representa las celdas de flotación incluyendo las unidades de splitter y mixers para

encajar los flujos de espumas y colas. En la Tabla 2.8 se detallan las unidades seleccionadas.

Tabla 2.8 Unidades de Sección 3 en MODSIM

N°	Unidades Sección 1	Unidades en MODSIM
1	Tanque acondicionador	Mixer
2	Celda Rougher	Bank of flotation cells
3	Celdas Scavenger	Bank of flotation cells
4	Celda Cleaner	Bank of flotation cells
5	Adición de flujo	Mixer
6	Repartición de flujo	Stream splitter

Fuente: Autores

Asimismo, las unidades fueron enlazadas en el diagrama con líneas de corriente y con “Add stream flyout” tres cuadros representativos para los valores de ley en g/t (cabeza – concentrado - cola), porcentaje de sólidos en % y flujo en t/h como se muestra en la Figura 2.13. Se pulsa “Accept flowsheet” y se guardó el trabajo como FLOTACIÓN.

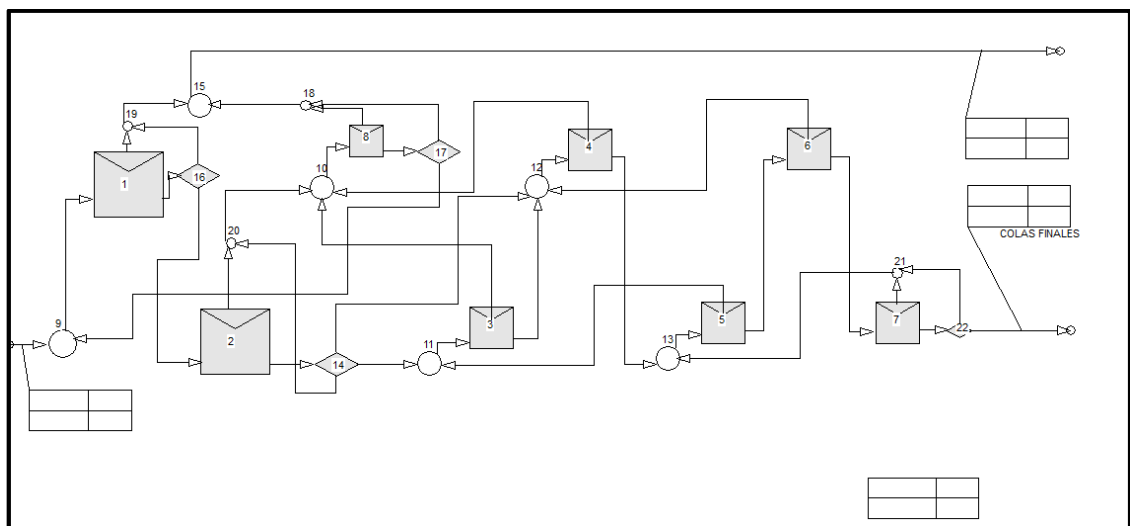


Figura 2.13 Diagrama de flujo Sección 3

Fuente: Autores

2.1.4.1 Entrada de datos de los equipos al sistema

Se utilizó la misma secuencia de las secciones anteriores con “Edit” y “edit system data” para ingresar los datos de alimentación al sistema definiendo dos tipos de mineral denominados concentrado y ganga, con gravedades específicas de 5 y 3 g/cm³ respectivamente y tamaño máximo de partícula de 150 µm como se indica

en la Figura 2.14. Los valores de la distribución de tamaño de la sección 2, es producto de alimentación a la flotación por lo que se enlaza la misma distribución de tamaño del mineral.

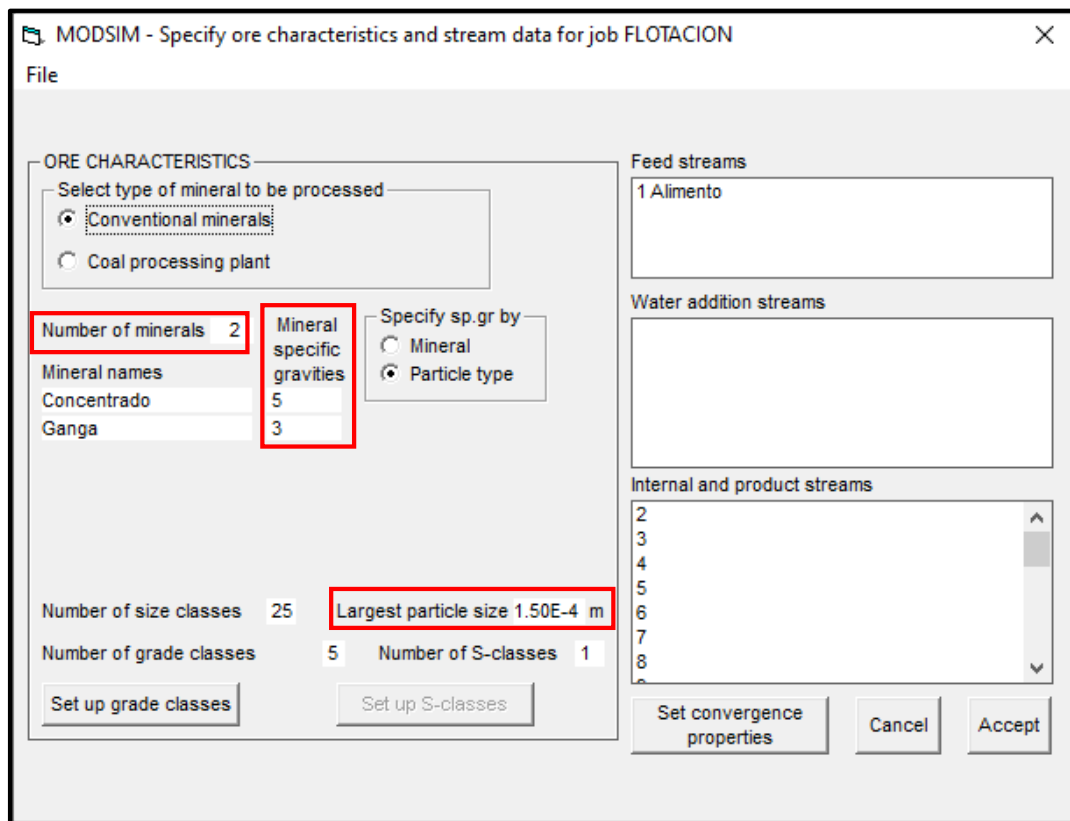


Figura 2.14 Entrada de datos al sistema Sección 3

Fuente: Autores

Desde “Edit” y “edit unit model parameters” se seleccionó el modelo KLIM ingresando parámetros como: dimensiones de las celdas, porcentaje de sólidos y altura de espumas. En el APÉNDICE K se presentan los datos por cada celda y en el APÉNDICE L el ingreso de sus parámetros.

2.1.4.2 Simulación

Se procedió a realizar la simulación con “Run simulation”. El trabajo culminado se visualiza con “View flowsheet”, mostrando tonelaje y ley de oro para cabeza – concentrado – cola formando un balance metalúrgico de la sección 3.

2.2 Evaluación económica

2.2.1 Estimación de los costos de equipos principales

La simulación económica fue realizada en Excel. Para la estimación del costo de capital se utilizó la estimación factorizada basada en los costos de los equipos principales.

2.2.1.1 Zaranda de doble piso de malla

En la Figura 2.15 se ilustra la ubicación de la zaranda de doble piso de malla dentro del diagrama de flujo en la sección 1. Con las dimensiones proporcionadas en la Tabla 2.2 y utilizando la ecuación (1.1), se estimó el precio del equipo. Los valores de $a = 2.033$ y $b = 0.52$ son definidos por (Andrew Mular, 1998). Donde:

$$x = (\text{ancho})^2(\text{longitud}), \text{ en } ft^3 \quad (2.1)$$

El precio incluye la transmisión, caja de alimentación y excluye la malla con el motor.

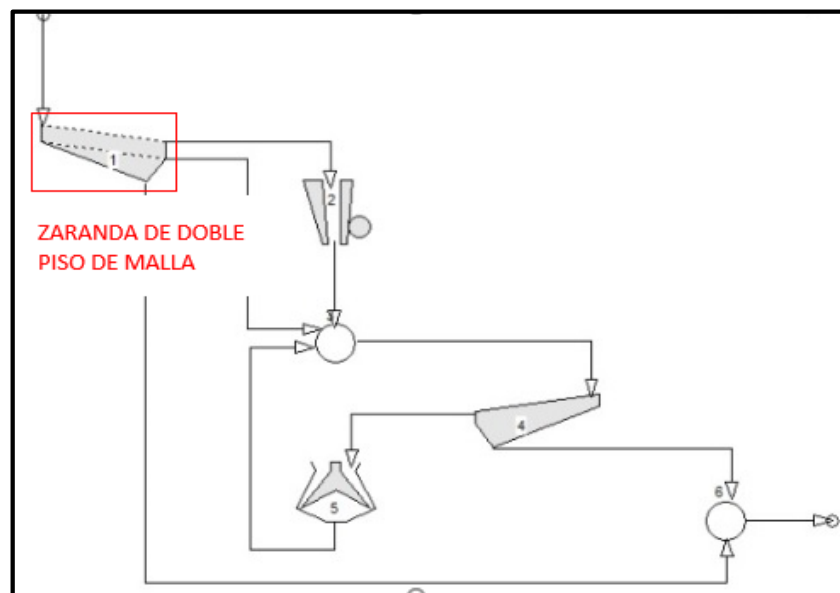


Figura 2.15 Zaranda de doble piso de malla Sección 1

Fuente: Autores

2.2.1.2 Trituradora de mandíbula

En la Tabla 2.9 se muestran las dimensiones que conforman la alimentación de la trituradora de mandíbula.

Tabla 2.9 Datos Trituradora de mandíbula

Datos de trituradora de mandíbula	
Descripción	in
Ancho de alimentación	28
Largo de alimentación	16
Área de abertura de alimentación	48

Fuente: autores

Utilizando la ecuación (1.1) se estimó el precio del equipo, donde “x” toma el valor de:

$$x = \text{área de alimentación en in}^2 \quad (2.2)$$

Los valores definidos por (Andrew Mular, 1998) para rangos de “x” entre 36 a 550, proporciona los valores de $a = 11.840$ y $b = 0.34$. El precio incluye la transmisión, sistema de lubricación y excluye el motor. En la Figura 2.16 se ilustra la ubicación del equipo dentro del diagrama de flujo en la sección 1.

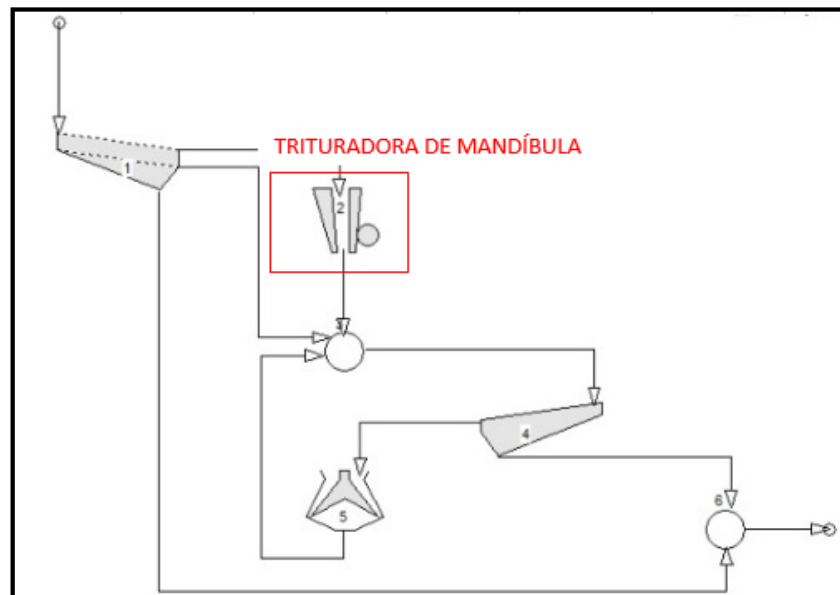


Figura 2.16 Trituradora de mandíbula Sección 1

Fuente: Autores

2.2.1.3 Zaranda de alta frecuencia

En la Figura 2.17 se ilustra la ubicación de la zaranda de alta frecuencia dentro del diagrama de flujo en la sección 1. Con las dimensiones proporcionadas en la Tabla 2.4 y utilizando la ecuación (1.1), se estimó el precio del equipo. Los valores de $a = 1.041$ $b = 0.59$ son definidos por (Andrew Mular, 1998). El valor de “x” se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$x = (\text{ancho})^2(\text{longitud}), ft^3 \quad (2.3)$$

El precio incluye la transmisión y la caja de alimentación, excluyendo el motor y la malla.

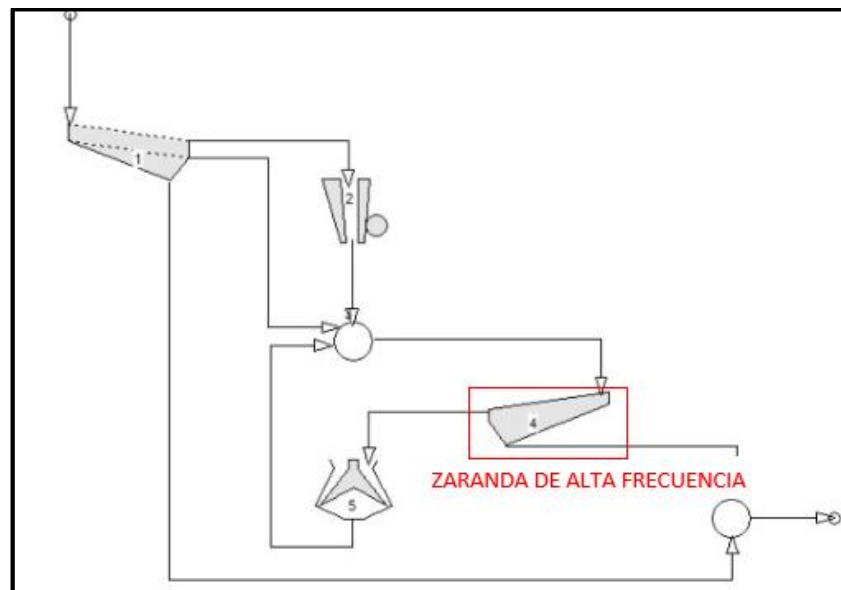


Figura 2.17 Zaranda de alta frecuencia Sección 1

Fuente: Autores

2.2.1.4 Trituradora de cono

Utilizando la ecuación (1.1) se estimó el precio del equipo, donde “x” toma el valor de:

$$x = \text{diámetro en el manto en el anillo de descarga, en ft} \quad (2.4)$$

En la Tabla 2.10 se muestra el valor del diámetro del manto de la trituradora de cono.

Tabla 2.10 Datos Trituradora de cono

Descripción	ft	in
Diámetro de manto en el anillo de descarga	0.04	0.51

Fuente: autores

La información brindada por (Andrew Mular, 1998), indica que para diámetros de entre 0.50 y 2 pulgadas se seleccionará un diámetro de la trituradora en el espacio anular de 4.25 pies. Al tratarse de una trituradora de cono estándar, los valores son: $a = 25.070$ y $b = 1.76$. El precio incluye el sistema de transmisión y lubricación y excluye el motor. En la Figura 2.18 se ilustra la ubicación de la trituradora de mandíbula dentro del diagrama de flujo en la sección 1.

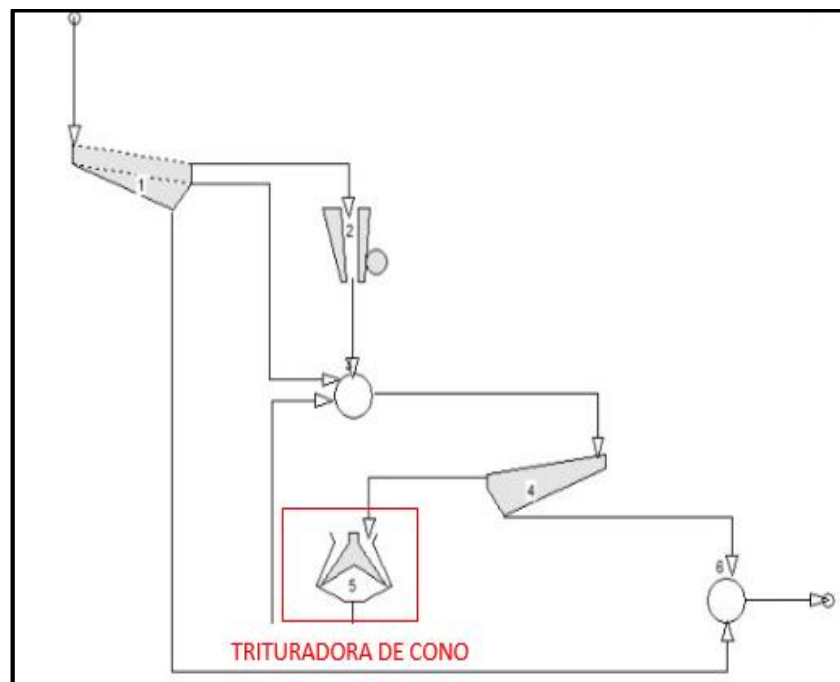


Figura 2.18 Trituradora de cono Sección 1

Fuente: Autores

2.2.1.5 Hidrociclón

El hidrociclón utilizado en el circuito de molienda es un modelo HD10B, ver diámetro en la Tabla 2.7, los revestimientos son de caucho como se ilustra en la Figura 2.19 de la sección 2. Se aplicó la ecuación (1.1), donde “x” toma el valor de:

$$x = \text{diámetro del hidrociclón, en in} \quad (2.5)$$

Los valores de $a = 3.969$ y $b = 0.22$ son definidos por (Andrew Mular, 1998). El precio incluye accesorios y revestimientos.

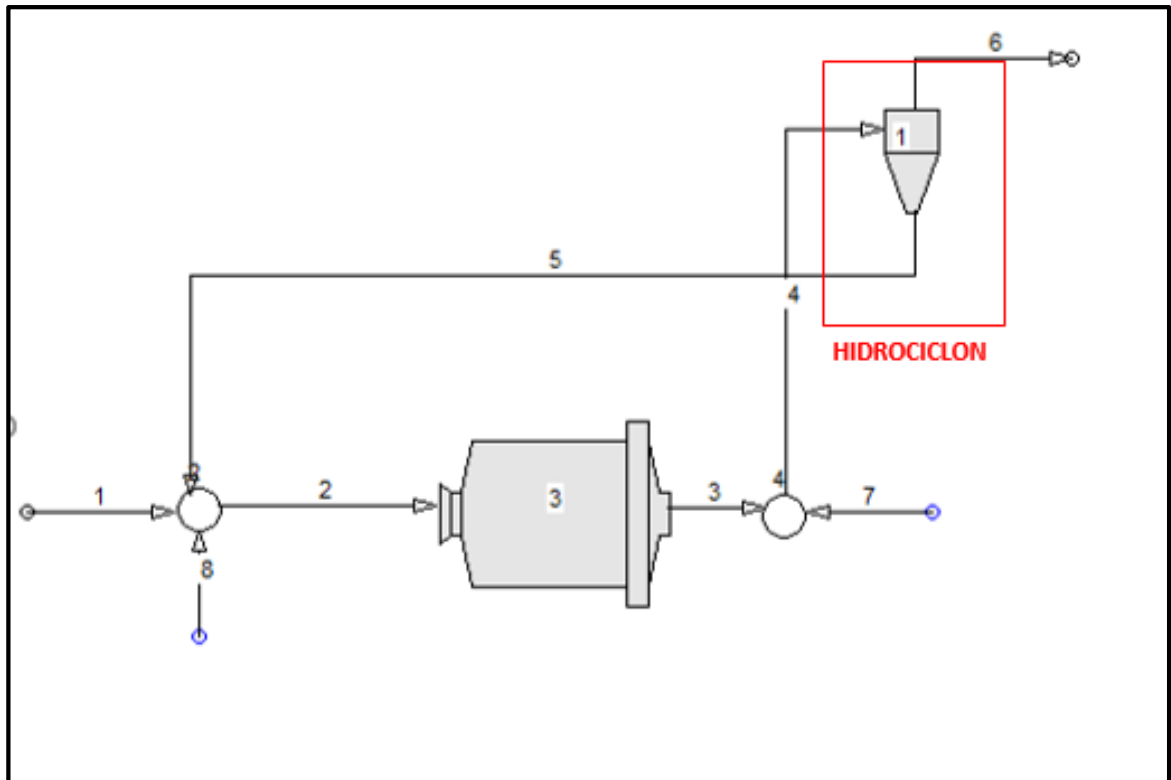


Figura 2.19 Hidrociclón Sección 2

Fuente: Autores

2.2.1.6 Molino de bolas

Las dimensiones del molino de bolas son: diámetro (D) 6 pies y longitud (L) 12 pies. La ecuación que se aplicó fue la siguiente:

$$\text{Precio (\$)} = aD^b \left[\frac{L}{D} \right] \quad (2.6)$$

Según el valor obtenido en D, se tomó los valores definidos por (Andrew Mular, 1998) que son: $a = 14.150$ y $b = 1.58$. El precio incluye revestimientos, respaldo de goma, conjunto de engranaje de anillo/piñón, simple/embrague, sistema de lubricación. Excluye el motor, arranque y carga de bolas. En la Figura 2.20 se indica la ubicación del molino en la sección 2.

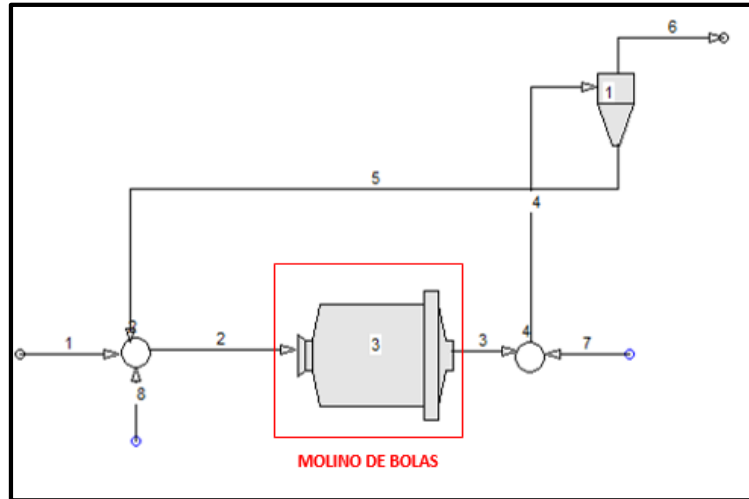


Figura 2.20 Molino de bolas Sección 2

Fuente: Autores

2.2.1.7 Celdas de flotación

Para conocer el precio del banco de celdas de flotación fue necesario conocer la capacidad de cada una de ellas. Se aplicó la ecuación (1.1), donde:

$$x = \text{capacidad de celda, ft}^3 \quad (2.7)$$

Los valores definidos por (Andrew Mular, 1998) para una celda de flotación de capacidad entre 9 a 450 pies³ son a = 3.223 y b = 0.39. El costo incluye el protector de motor, cajas de alimentación y descarga; excluye motor, palas y lavadores. En la

Figura 2.21 se ilustra el circuito de flotación en el software de la sección 3.

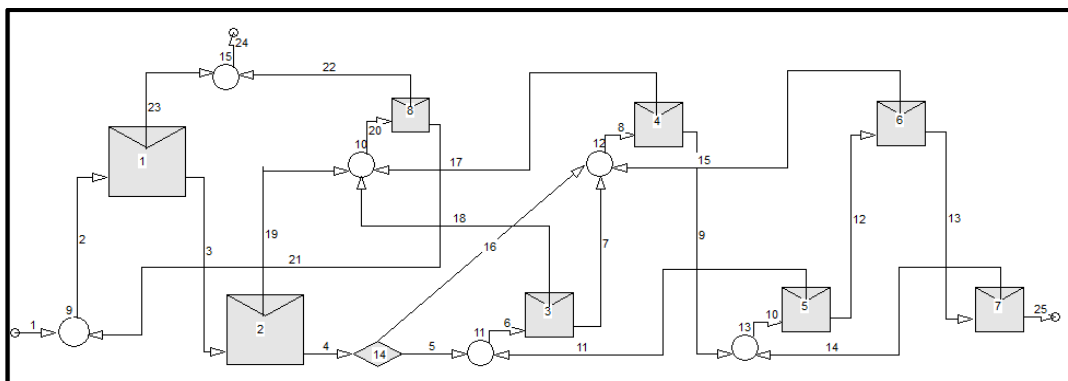


Figura 2.21 Celdas de flotación Sección 3

Fuente: Autores

2.2.2 Estimación de costos de capital

Los costos de los equipos ya comprados son basados en un Índice M&S (Mine&Mill) de 1700.

2.2.2.1 Costos de equipos adquiridos

Para el cálculo se suma los precios de equipos principales: zaranda de doble piso de malla, trituradora de mandíbula, zaranda de alta frecuencia, trituradora de cono, hidrociclón, molino de bolas y celdas de flotación.

2.2.2.2 Costo de equipos instalados

Costo de equipos instalados = 1.43 veces el valor de costos de equipos adquiridos.

2.2.2.3 Tubería utilizada en procesos

Tuberías = Incrementando en un 10 % el costo de equipos instalados.

2.2.2.4 Instrumentación

Instrumentación = Incrementando en un 3 % el costo de equipos instalados.

2.2.2.5 Edificios

Edificios = Incrementado en un 35% el costo de equipos instalados. Incluye la obra civil para las trituradoras, molino, taller mecánico y edificio administrativo.

2.2.2.6 Auxiliares

Auxiliares = Incrementado en un 10 % el costo de equipos instalados. Incluye reservas de combustible, suministros de agua y depósitos de relaves.

2.2.2.7 Líneas exteriores

Líneas exteriores = Incrementando en un 8% el costo de equipos instalados. Refiere al tendido eléctrico.

2.2.2.8 Costo total de planta física

Es la sumatoria de: costo de equipos instalados, tubería de procesos, instrumentación, edificios, auxiliares y líneas exteriores.

2.2.2.9 Ingeniería y construcción

Representa el 25% del costo total de planta física.

2.2.2.10 Contingencias

Contingencias = Incrementando en un 10% el costo total de la planta.

2.2.2.11 Coeficiente de seguridad en los cálculos

Representa el 5% del costo total de planta física.

2.2.2.12 Costo de capital fijo

Es la adición de: costo total de planta física, ingeniería y construcción, contingencias y coeficiente de seguridad.

2.2.2.13 Costo de trabajo

Representa el 12 % del costo de capital fijo.

2.2.2.14 Capital total de inversión

Es la suma de costo de trabajo y capital total de inversión.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados fueron expuestos por simulaciones divididas en las tres secciones antes mencionadas, identificando puntos depresivos en el diseño de la planta. Además, se presentan los costos de capital y operación para un análisis de sensibilidad respectivo.

3.1 Simulación en MODSIM

3.1.1 Sección 1: Trituración

La simulación de la sección 1 fue construida para una alimentación de 50 t/h al circuito. Asimismo, comprende una etapa primaria y secundaria:

En la etapa primaria, los equipos que la conforman son una zaranda de doble piso de malla y una trituradora de mandíbulas. En la etapa secundaria, los equipos son una zaranda de alta frecuencia y una trituradora de cono. El diagrama de flujo de la sección 1 se muestra en la Figura 3.1.

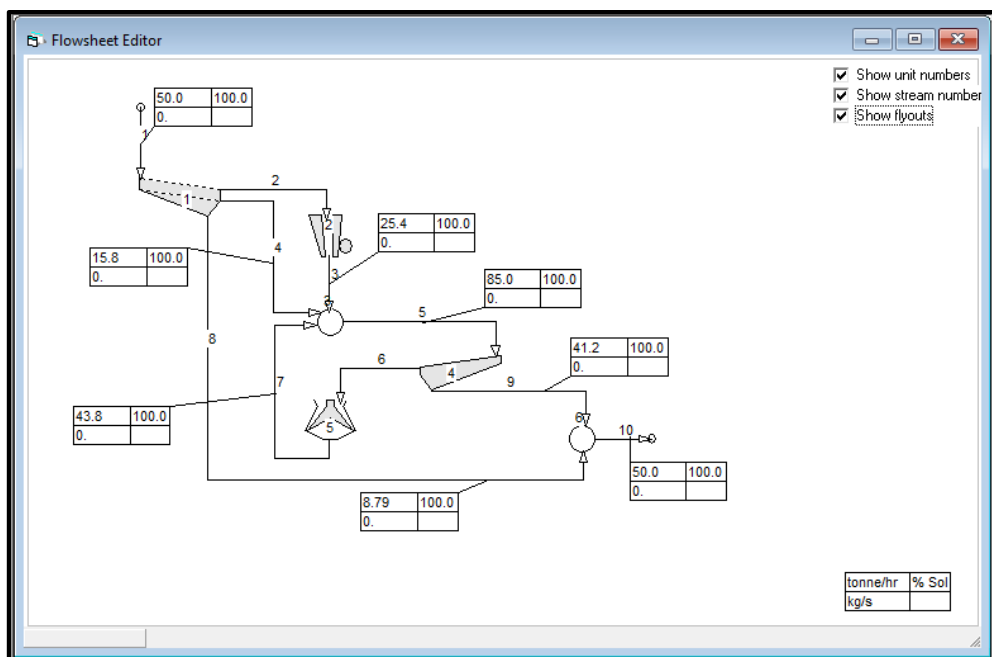


Figura 3.1 Resultado simulación Sección 1

Fuente: Autores

Análisis de Resultados:

En la etapa primaria, la simulación reflejó un mensaje de sobredimensionamiento del área de operación en la zaranda de doble piso. El equipo tiene un largo de malla de 2.44 m y un ancho de 1.22 m, por lo que su capacidad instalada se convierte en 2.98 m². En la Figura 3.2, MODSIM propone trabajar con una capacidad de 0.73 m², siendo las dimensiones posibles de 0.91 m en largo y ancho.

Screen area required	0.733 sq meters
Length of screen	2.438 m
Width of screen	1.219 m
Screen area installed	2.973 sq meters

Figura 3.2 Resultado Zaranda de doble piso de malla

Fuente: Autores

La trituradora de mandíbulas mantiene un reglaje con un producto de salida de 38.10 mm hacia la etapa secundaria. En la Figura 3.3, la simulación indicó que el equipo entrega un producto d₈₀ = 34.53 mm manteniendo una similitud con el parámetro definido en la operación.

Number of crushers required.....
Impact work index of the material is 12.00 kWhr/ton
80% passing size in feed is 124.15 mms.
80% passing size in product is 34.53 mms.
Estimated power requirements 7.75 kW

Figura 3.3 Resultado Trituradora de mandíbula

Fuente: Autores

En la etapa secundaria, la simulación mostró que la zaranda de alta frecuencia se encuentra con un infradimensionamiento en su capacidad instalada de 1.49 m², con un largo y ancho de 1.22 m. En la Figura 3.4, MODSIM sugiere trabajar con un área requerida de 2.30 m² con las dimensiones posibles de largo y ancho de 1.52 m.

Screen area required	2.304 sq meters
Length of screen	1.219 m
Width of screen	1.219 m
Screen area installed	1.486 sq meters

Figura 3.4 Resultado Zaranda de alta frecuencia

Fuente: Autores

Con la trituradora de cono no se tuvo ningún mensaje en la simulación, por lo que el equipo se encuentra acertado al entregar un producto final del circuito, $d_{80} = 12.70$ mm.

3.1.2 Sección 2: Molienda

La operación en la sección 2 acoge el producto que entrega la sección anterior que es almacenado en una tolva de mineral fino. El circuito cuenta con un molino de bolas de 1.83 m de diámetro y 3.66 m de largo, un hidrociclón de diámetro 25.40 cm y una bomba de pulpa que fue simplificada en la simulación. En la simulación se agregaron dos unidades de “mixer” para incluir el flujo de agua en la entrada y descarga del molino. La Figura 3.5 se muestra el diagrama de flujo de la sección 2:

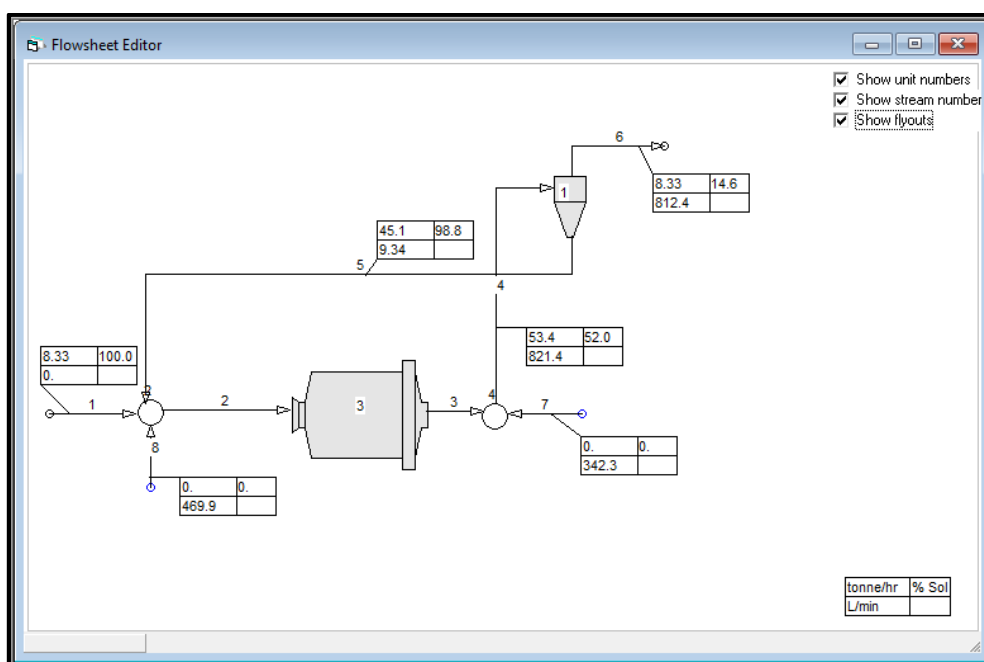


Figura 3.5 Resultado simulación Sección 2

Fuente: Autores

Análisis de resultados:

La simulación indicó un porcentaje de sólidos de 14.60% para el hidrociclón, siendo muy inferior al parámetro real de operación real de 28 – 30%. En la Figura 3.6, el resultado reflejó un corte intermedio del equipo de $d_{50} = 55.19 \mu\text{m}$ (corregido), manteniendo una similitud al parámetro real de operación de 52 % de mineral pasante con tamaño de $45 \mu\text{m}$.

```
Volumetric flow split to underflow 0.270
Sharpness parameter lambda = 2.39
Sharpness index = 0.519
D50c for particle type 1 is 55.19 microns
```

Figura 3.6 Resultado Hidrociclón

Fuente: Autores

Asimismo, el flujo de agua en la simulación no se encuentra similar a la cantidad que ingresa al circuito, por lo que se puede manipular en el software hasta alcanzar el volumen real de operación. Al molino se le proporcionó 8.33 t/h equivalente a una producción real de 200 t/d.

3.1.3 Sección 3: Flotación

El circuito en la planta se encuentra formado por una celda “acondicionador” para la adición de reactivos, una celda “rougher”, seis celdas “scavenger” y una celda “cleaner”. A pesar del conocimiento operativo y funcional de cada celda, MODSIM permite conjugar con el número de celdas y sus productos para obtener un esquema similar al real. En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de flujo de la sección 3:

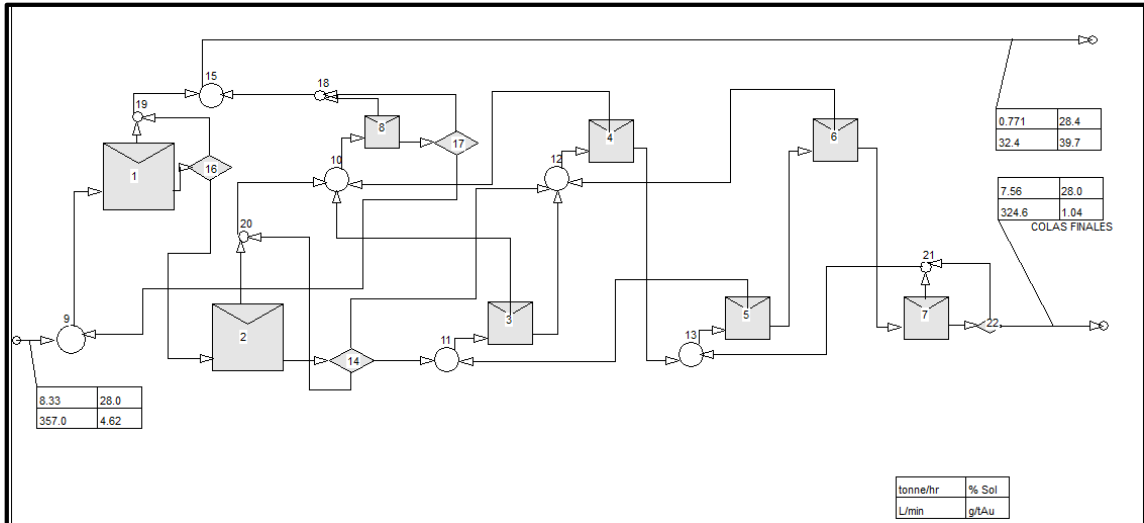


Figura 3.7 Resultado simulación Sección 3

Fuente: Autores

Análisis de resultados:

La simulación de la última sección mostró un balance metalúrgico comprendiendo el tonelaje tratado y ley de oro como componentes principales. El tonelaje de alimentación se encuentra en 8.33 t/h, por lo que se derivan 0.77 t/h al concentrado y 7.56 t/h al relave.

Con respecto a la ley de oro, la simulación reflejó una ley de cabeza de 4.62 g/t, concentrado de 39.70 g/t y relave de 1.04 g/t con un porcentaje de recuperación en el circuito del 79.57%.

Se tomó aleatoriamente un mes de producción real para comparar las leyes respectivas: cabeza con 5.36 g/t, concentrado de 39 g/t y relave de 0.91 g/t con un porcentaje de recuperación del 85.01% siendo aproximado a lo obtenido en la simulación.

3.2 Estimación de coste de equipos principales

3.2.1 Zaranda de doble piso de malla

Se reemplazó datos en la ecuación (1.1).

Se reemplazó datos en (2.1):

$$X = 128 \text{ pies}^3$$

Para el 2.021 el M&S es de 1.700.

Aplicando la ecuación (1.1) se obtuvo el precio de la zaranda:

Precio = 31.128 \$.

3.2.2 Trituradora de mandíbula

Se empleó la ecuación (1.1), para x se utiliza la ecuación (2.2) y los valores de Tabla 2.9, se obtuvo el precio de este equipo con el M&S DE 1.700, que corresponde al año 2021.

Precio = 111.100 \$.

3.2.3 Zaranda de alta frecuencia

Para conocer el valor de X, se emplea la ecuación (2.3), se reemplazó los valores de la Tabla 2.4.

$X = 64 \text{ ft}^3$

Utilizando la ecuación (1.1) y actualizando el M&S al año 2021, se obtuvo el precio de este equipo:

Precio = 14.559 \$.

3.2.4 Trituradora de cono

Se obtuvo X de la ecuación (2.4) y con los valores de la Tabla 2.10, se aplicó la ecuación (1.1) finalmente se actualizó el precio al índice de costo correspondiente al año 2.021.

$X = 0.51 \text{ ft.}$

Precio = 9.390 \$.

3.2.5 Hidrociclón

Se utilizó los valores de Tabla 2.7 y la ecuación (2.5) para conocer X.

$X = 10 \text{ in.}$

Se empleó la ecuación (1.1), se actualizó el precio al año 2.021 y el costo de este equipo fue de:

Precio = 7.910 \$.

3.2.6 Molino de bolas

Se reemplazó los valores de la ecuación (2.6), el precio se actualizó con el índice de costo correspondiente al año 2.021 y se obtuvo el precio del molino de bolas.

Precio = 580.805 \$.

3.2.7 Celdas de flotación

El valor del banco de celdas de flotación se obtuvo al reemplazar los valores del APÉNDICE L en la ecuación (2.7) para conocer X. Se aplicó la ecuación (1.1) y se actualizó el precio con el M&S 1.700.

Precio celda S1 = 43.064 \$.

Precio celda S2 = 38.701 \$.

Precio celda cleaner = 25.526 \$.

Precio celda 1 = 38.701 \$.

Precio celdas 2-3-4-5 = 38.701 \$.

Precio banco de celdas = 300.795 \$.

En la tabla muestra se recopila los precios actualizados de los equipos principales:

Tabla 3.1 Costo de equipos principales

Precios de equipos principales	
Nombre de equipo	Precio actualizado 2021, M&S (1700)
Zaranda doble piso	31.128 \$
Trituradora de mandíbula	78.929 \$
Zaranda de alta frecuencia	14.559 \$
Trituradora de cono	9.390 \$
Hidrociclón	7.910 \$
Molino de bolas	580.805 \$
Celdas flotación	300.795 \$

Fuente: Autores

3.3 Estimación de costos de capital

En la **Tabla 3.2** se indican los costos de capital siguiendo la metodología de CAPOSTS.

Tabla 3.2 Costos de capital

ESTIMACIÓN DE COSTOS DE CAPITAL	
1. Costos de equipos adquiridos	1.023.515 \$
Zaranda doble piso	31.128 \$
Trituradora de mandíbula	78.929 \$
Zaranda de alta frecuencia	14.559 \$
Trituradora de cono	9.390 \$
Hidrociclón	7.910 \$
Molino de bolas	580.805 \$
Celdas flotación	300.795 \$
2. Costos de instalación de equipos (1.43 del ítem 1)	1.463.626 \$
3. Tubería utilizada en el proceso (10 % del ítem 2)	1.609.989 \$
4. Instrumentación (3 % del ítem 2)	1.507.535 \$
5. Edificios (35% del ítem 2)	1.975.896 \$
6. Auxiliares (suministro de agua, depósito de relave) (10 % del ítem 2)	1.609.989 \$
7. Líneas exteriores (8 % ítem 2)	1.580.717 \$
8. Costos totales de planta física (2+3+4+5+6+7)	9.747.752 \$
9. Ingeniería y construcción (25 % del ítem 8)	12.184.691 \$
10. Contingencias (10 % del ítem 8)	10.722.528 \$
11. Coeficiente de seguridad (5 % del ítem 8)	10.235.140 \$
12. Costes de capital fijo (8+9+10+11)	42.890.111 \$
13. Capital de trabajo (12 % del ítem 12)	5.146.813 \$
14. Capital de inversión total (12+13)	48.036.924 \$

Fuente: Autores

3.4 Análisis de sensibilidad

Se estableció cambios del -4 %, -8%, +4% y +8% para ingresos por venta de Au en lingotes y en concentrado, coste de equipos principales, energía eléctrica y costos operativos, la variación de estos parámetros se representó en gráficos. El grado de sensibilidad es directamente proporcional a la pendiente de cada recta.

3.4.1 Variación de ingresos por kg/año de Au en lingotes

Es la variable más influyente dentro del análisis y siendo muy frecuente en proyectos mineros. En la Figura 3.8 se indica que la variación dependerá del volumen de ventas y del precio de sus productos, es decir, son agentes que

podrían causar que el VAN tenga mayor sensibilidad. Las variaciones del TIR fueron del 10% al 14%.

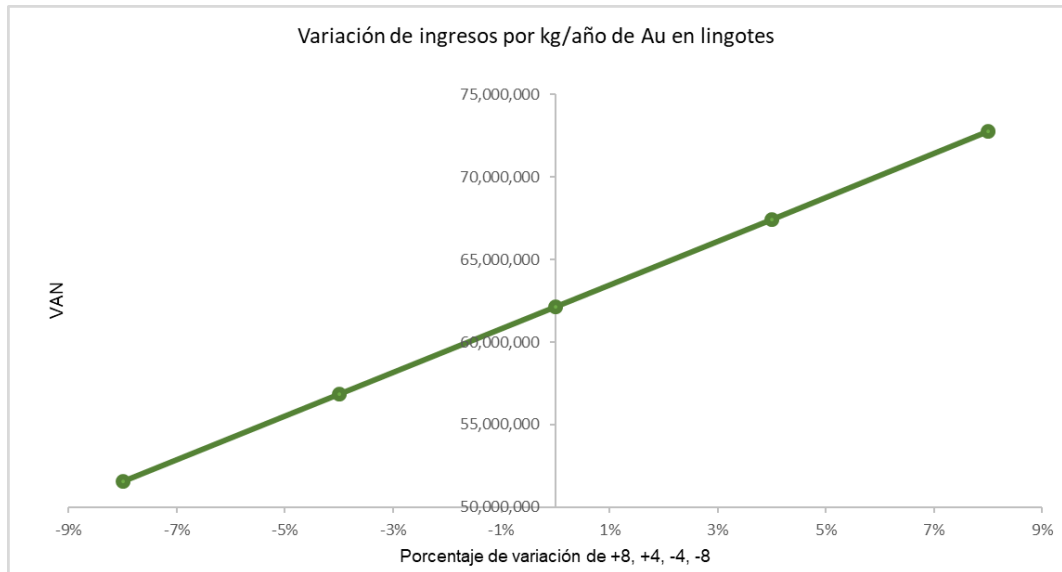


Figura 3.8 Variación de ingresos por kg/año de Au en lingotes
Fuente: Autores

3.4.2 Variación de ingresos por kg/año de Au en concentrado

En la Figura 3.9 se observa que la variación de este parámetro no tiene una influencia importante en la estabilidad del proyecto.

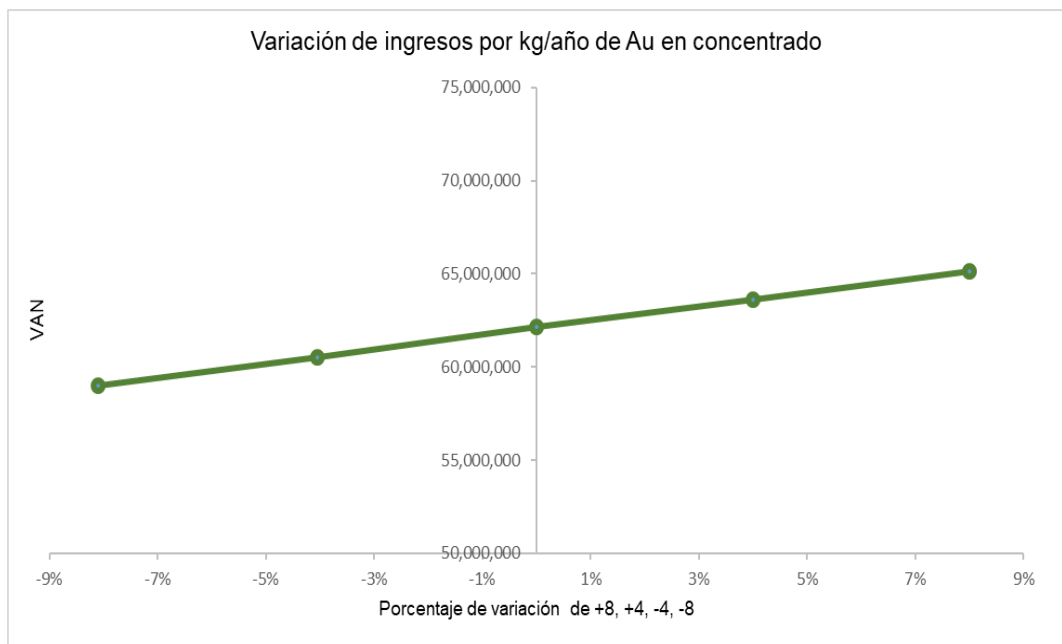


Figura 3.9 Variación de ingresos por kg/año de Au en concentrado
Fuente: Autores

3.4.3 Variación de costos de equipos principales

Se realizó una estimación de costes de los equipos principales de planta fijando un valor de 1.023.515 \$. Se determinó que la variación con el porcentaje +8%, se encuentra en 1.105.396 \$, no generando mucho aumento en los costes de inversión, como se muestra en la Figura 3.10.

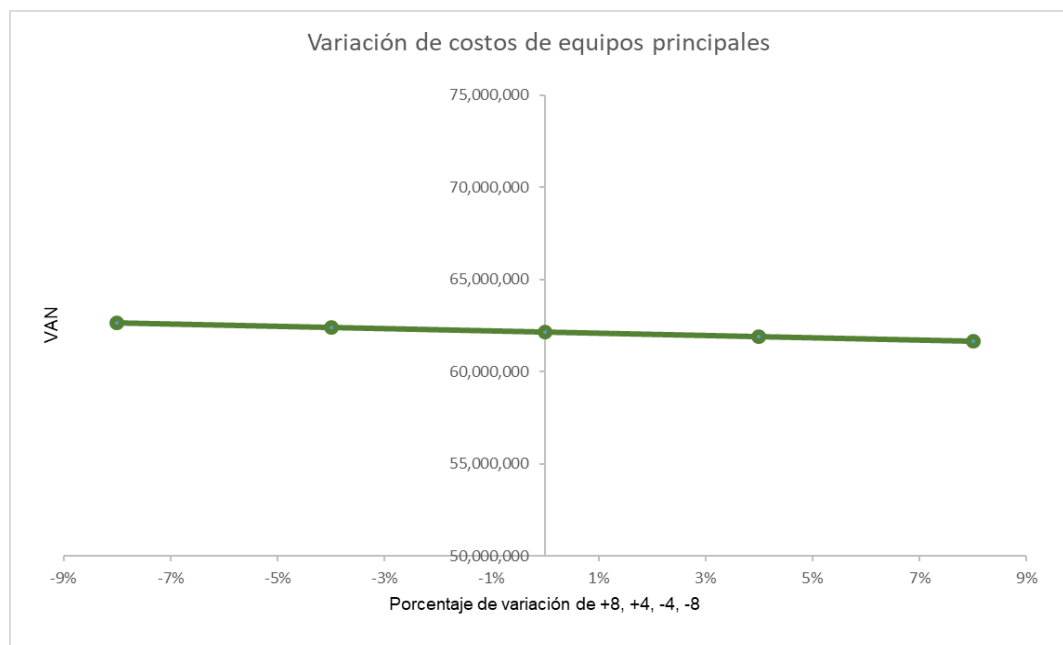


Figura 3.10 Variación de costo de equipos principales

Fuente: Autores

3.4.4 Variación de energía eléctrica

En la Figura 3.11 se muestra que la variación en el valor de la energía eléctrica no causa gran impacto en la inversión. Es la menos influyente en el VAN, indicando una baja sensibilidad dentro del proceso productivo.

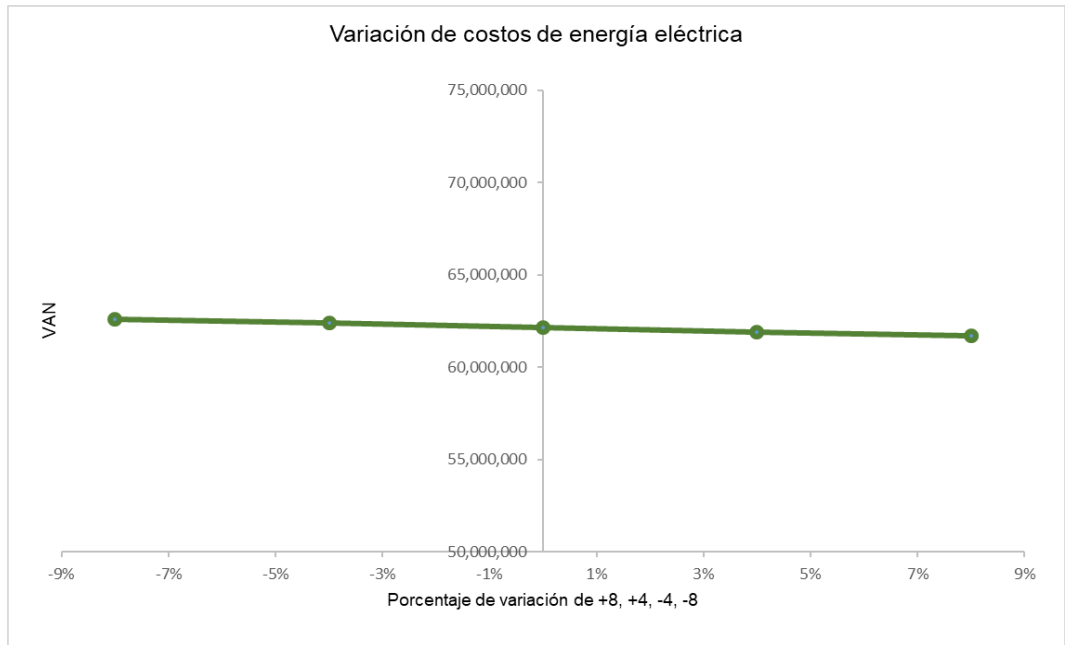


Figura 3.11 Variación de Costo de energía eléctrica
Fuente: Autores

3.4.5 Variación de costos operativos

Se observa en la Figura 3.12 la variación de este parámetro considerado del -8 al +8% y que conlleva a un cambio menor en cuanto al costo financiero. Dentro de la variación de costos operativos está considerado un aumento del 15 % en los sueldos del personal que labora en Planta.

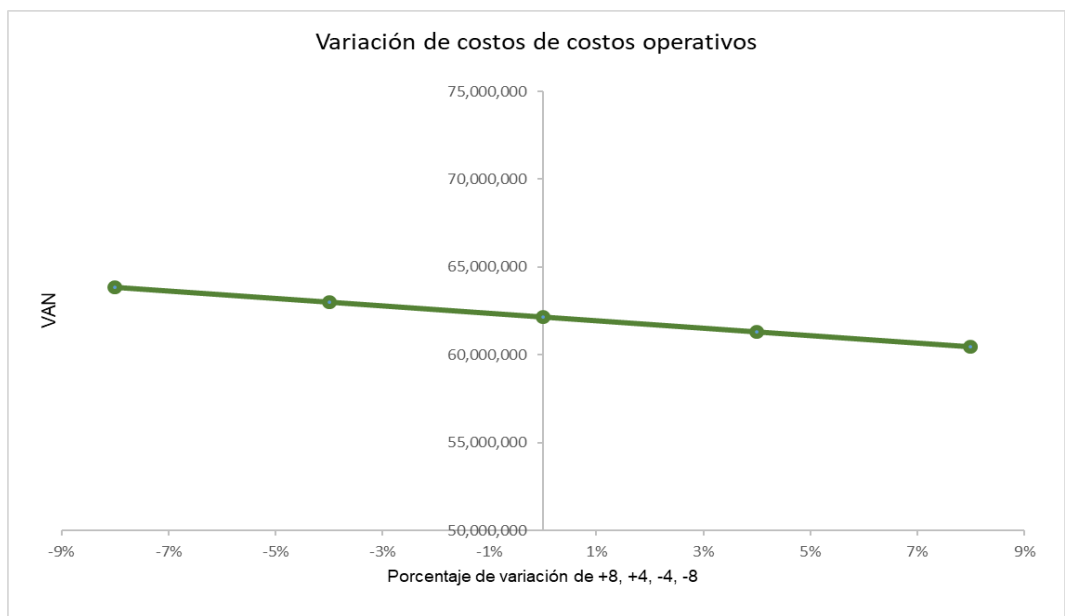


Figura 3.12 Variación de costos operativos
Fuente: Autores

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El capítulo abarca una síntesis de la optimización técnico – económica de la planta, exponiendo la respuesta a los objetivos específicos planteados. Se recogen los resultados de la simulación de las tres secciones y la estimación de costos de la ampliación del proyecto para obtener las conclusiones más relevantes de estudio. Se finaliza con recomendaciones puntuales y concretas que sirvan de base para futuras investigaciones.

4.1 Conclusiones

Se identificaron los principales parámetros operativos de entrada y salida de los equipos los cuales fueron utilizados en la modelización que se realizó de la plata.

Se modelaron las operaciones unitarias que integran el diagrama de flujo mediante el software MODSIM, pudiendo evaluar de esta forma la influencia de los diferentes parámetros.

Se evaluaron las modificaciones que permitieron determinar:

- Para la sección 1, un infradimensionamiento en la capacidad instalada de la zaranda de alta frecuencia con un área de operación de 1.49 m^2 , siendo la sugerencia que indica el software de instalar un área de 2.30 m^2 con la finalidad de obtener más tiempo de residencia del mineral para mejor su clasificación. Asimismo, los resultados indicaron sobredimensionamiento en la capacidad instalada de la zaranda de doble piso de malla con un área de 2.97 m^2 , requiriendo el circuito un área de 0.73 m^2 . Actualmente, el equipo se encuentra operativo y no se encuentra en planes de remoción.
- Los resultados de la sección 2 permitió reconocer un parámetro del hidrociclón que se encuentra apegado a la operación real, concluyendo que el equipo se encuentra trabajando en una clasificación ideal. Se obtuvo un $d_{50c} = 55 \mu$.

- En la sección 3, MODSIM produjo una simulación proporcionando un balance metalúrgico donde se determinó una aproximación a los productos de flotación, siendo éstos, cabeza – concentrado – relave. Se tomó de referencia un mes aleatorio en la producción real y se comparó con la simulación concluyendo que el circuito se encuentra estructurado de forma empírica al mantener celdas de varios modelos que han tenido cambios en sus diseños de sus versiones originales. Las celdas se encuentran conjugadas de tal manera que los productos se encuentran con una ley promedio de relave de 1 g/t, concentrado de 40 g/t y cabeza de 4 g/t. Además, el circuito se encuentra diseñado de forma empírica al no tener correctamente definido las etapas de rougher – scavenger – cleaner, manteniendo un porcentaje de recuperación de 82%.

Se realizó un análisis de sensibilidad de la inversión considerando los parámetros de variación de ingresos por kg/año de oro en lingotes y en concentrado, variación de costo de equipos principales, variación de energía eléctrica y variación de costos operativos ; habiéndose observado que el más influyente es el parámetro de variación de ingresos y que el que menos impacto causó es el parámetro de energía eléctrica.

4.2 Recomendaciones

- Poner el interés en la verificación de los datos de entrada de la simulación reflejen la realidad de la planta.
- Realizar el estudio considerando variables combinadas de los parámetros que se variaron para realizar el estudio de sensibilidad.
- Verificar si es posible valorizar otros elementos u otras materias primas que puedan ser de interés económico.
- La empresa valore la posibilidad de recopilar más datos para poder realizar más simulaciones para tener reflejado de manera más real la planta en el simulador.

- Proponer a SOMILOR S.A. el uso de MODSIM para optimizar el circuito de flotación.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrew Mular, R. P. (1998). *CAPCOSTS*. Canadá : Canadian Institute of mining, metallurgy and petroleum.
- Association for the Advancement of Cost Engineering. (1956). *AACE INTERNATIONAL*. Obtenido de <https://web.aacei.org/resources/publications/magazines>
- Aviles, M., & Ortega, A. (11 de Marzo de 2017). *Repositorio Dspace*. Obtenido de Escuela Superior Politecnica del Litoral: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/38264>
- Barry A. Wills, T. N.-M. (2006). *Mineral Processing Technology*. Oxford: Elsevier Science & Technology Books.
- DISMET. (2017). *DISMET*. Obtenido de <https://www.dismet.com/mineria-colombia-dismet/>
- ENR. (1874). *Engineering News Record*. Obtenido de <https://www.enr.com/>
- ICBA. (2015). *ICBA*. Obtenido de <https://icba.com.pe/producto-hidrociclones>
- INDIAMART. (2018). *INDIAMART*. Obtenido de <https://www.indiamart.com/proddetail/jaw-crusher-machine-19956467930.html>
- Instituto Tecnológico Geominero de España. (1991). *MANUAL DE EVALUACIÓN TÉCNICO-MINERO DE PROYECTOS DE INVERSIÓN*. Madrid: Napo.
- Jerez Daniel, P. J. (07 de 2016). *Repositorio Académico de la Universidad de Chile*. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143294>
- L. Pintelon, F. P. (1997). Estimación de los costos de construcción de la planta. *Ingeniería química*, 98-104.
- Lama, A. C. (09 de 2018). *Repositorio Abierto de la Universidad de Cantabria*. Obtenido de UNICan: <http://hdl.handle.net/10902/14835>
- M.A. FORD, R. K. (1984). THE SIMULATION OF ORE-DRESSING PLANTS. *International Journal of Mineral Processing*, 285--304.
- Metallurgist. (2012). *Metallurgist*. Obtenido de <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/molino-de-bolas/>
- Mineral Technologies International. (1978). *Mineral Technologies International*. Obtenido de <http://www.mineraltech.com/MODSIM/index.html>

- Moises Bustamante, A. D. (2016). Simulación de plantas de procesamiento de minerales a través de MODSIM. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 33-37.
- Obregon, C. (2016). Optimización del Blending con aplicaciones de programación lineal para el incremento del valor económico del mineral en la unidad minera catalina Huanca S.A.C. *UNSA Investiga*, 11.
- QUISPE, C. J. (2016). *repositorio.unsa*. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/3365/IMobqucj.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ramírez, A. E. (1996). Aplicación de algunos modelos matemáticos a la toma de decisiones. *Política y Cultura*, 183-198.
- Raúl, L. O. (2017). *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2568/Millojsr.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Roldan, J. (2014). Análisis de variables para evaluación financiera de proyectos de minería de oro en Colombia con especial énfasis en el Riesgo País - Caso Minero S.A. *Universidad EAFIT*, 2.
- Rubilar, M. T. (08 de 2006). *Repositorio Universidad de Chile*. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/>
- Sebastián, V. M. (09 de 2013). *Repositorio Académico de la Universidad de Chile*. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114670>
- Seongsoo Han, M. J.-t.-S. (2021). Diagnosis and Optimization of Gold Ore Flotation Circuit via Linear Circuit Analysis and Mass Balance Simulation. *Minerals*, 1-13.
- Velín, K. (21 de Mayo de 2014). *Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de BIBDIGITAL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7394>

APÉNDICES

APÉNDICE A

TRITURACIÓN

El mineral que es desalojado desde el interior mina se deposita en la tolva hasta llenar su capacidad; posteriormente el mineral es evacuado por un alimentador de placas y llevado por bandas transportadoras pasando por un electroimán al momento de ingresar a una zaranda primaria con piso de malla superior 50.8 mm y malla de piso inferior 19.05 mm, y dimensiones de 1.22 m de ancho y 2.44 de largo.

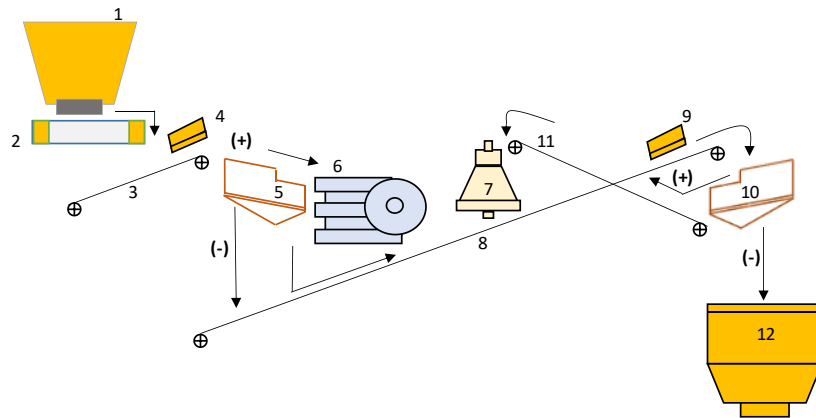
El producto de la malla superior se convierte en la alimentación de una trituradora de mandíbulas con reglaje de 38.1 mm y capacidad de 16 ~ 64 t/h, mientras que el producto del piso inferior se enlaza con el producto de salida de la trituradora de mandíbulas. El mineral que logre pasar por el doble piso de malla se dirige directamente a la tolva de finos.

El mineral producto de la unión entre la salida de la trituradora de mandíbulas y salida de la malla del piso inferior de la zaranda primaria es el alimento de una zaranda de alta frecuencia con dimensiones de 1.22 m de ancho y largo y malla de 15.88 mm. El mineral pasante de la malla ingresa a la tolva de finos mientras que el retenido pasa a una trituradora de cono con reglaje de 12.70 mm y capacidad de t/h.

El producto de salida de la trituradora de cono se enlaza con el producto unión entre la salida de la trituradora de mandíbulas y salida de la malla del piso inferior de la zaranda primaria, manteniendo un circuito cerrado para lograr que todas las fracciones del mineral lleguen a la reducción de tamaño requerida para la siguiente etapa de molienda.

El diseño del área de trituración comprende una serie de bandas transportadoras que no son tomadas para la simulación, pero mantienen el objetivo de conectar los equipos para el traslado de sus productos. El proceso de trituración se muestra en la siguiente figura.

Proceso de Trituración



LEYENDA

- 1 Tolva de Gruesos de 180 TM
- 2 Alimentador de placas
- 3 Banda Transportadora de 24"
- 4 Electroiman ERIEZ
- 5 Zaranda doble piso malla
- 6 Trituradora de Mandíbulas
- 7 Trituradora de Cono
- 8 Banda transportadora
- 9 Detector de metales Magnético
- 10 Zaranda de Alta frecuencia
- 11 Banda Transportadora
- 12 Tolva de Finos 240 TM

Fuente: Autores

APÉNDICE B

MOLIENDA

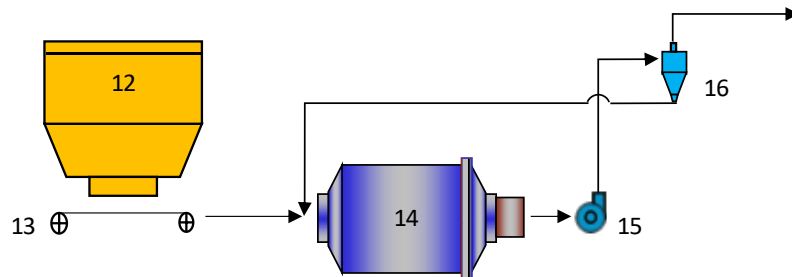
El área de molienda inicia con la acumulación del producto final de la trituración que se encuentra almacenada en una tolva de finos con capacidad para 240 t. El material es evacuado en la parte inferior de la tolva por una banda transportadora con velocidad de 4.20 m/min y ancho de 30 cm que entrega a un molino de bolas con dimensiones de 1.83 m de ancho y 3.66 m de largo.

El molino de bolas cuenta con una capacidad para 200 t/d, motor de 160 kW y un volumen determinado de bolas de hierro que permiten conseguir una reducción de tamaño de partículas con granulometría necesaria para la recuperación de minerales valiosos en la siguiente etapa de flotación por espumas.

El molino de bolas trabaja en conjunto con una bomba de pulpa que permite trasladar la descarga de mineral hacia un hidrociclón modelo HD10B; equipo utilizado para la clasificación de partículas gruesas y finas. Las partículas gruesas son separadas y se dirigen a través del ápex para su descarga retornando a la alimentación del molino (underflow); las partículas finas son separadas y evacuadas a través del vórtex para alimentar al circuito de flotación (overflow).

Los parámetros del molino son controlados por densidades en g/l en puntos definidos: peso de banda en kg, descarga molino (sin agua), alimentación (con agua), underflow (UF) y overflow (OF) y amperaje (A). Al final del molino, en la descarga de mineral cuenta con un trómel para retirar basura como bolas aplastadas y pedazos de cables. El proceso de molienda se muestra en la siguiente figura:

Proceso de Molienda



LEYENDA

12 Tolva de Finos 240 TM

13 Banda Transportadora

14 Molino de Bolas

15 Bomba de sólidos

16 Hidrociclón HD10B

Fuente: Autores

APÉNDICE C

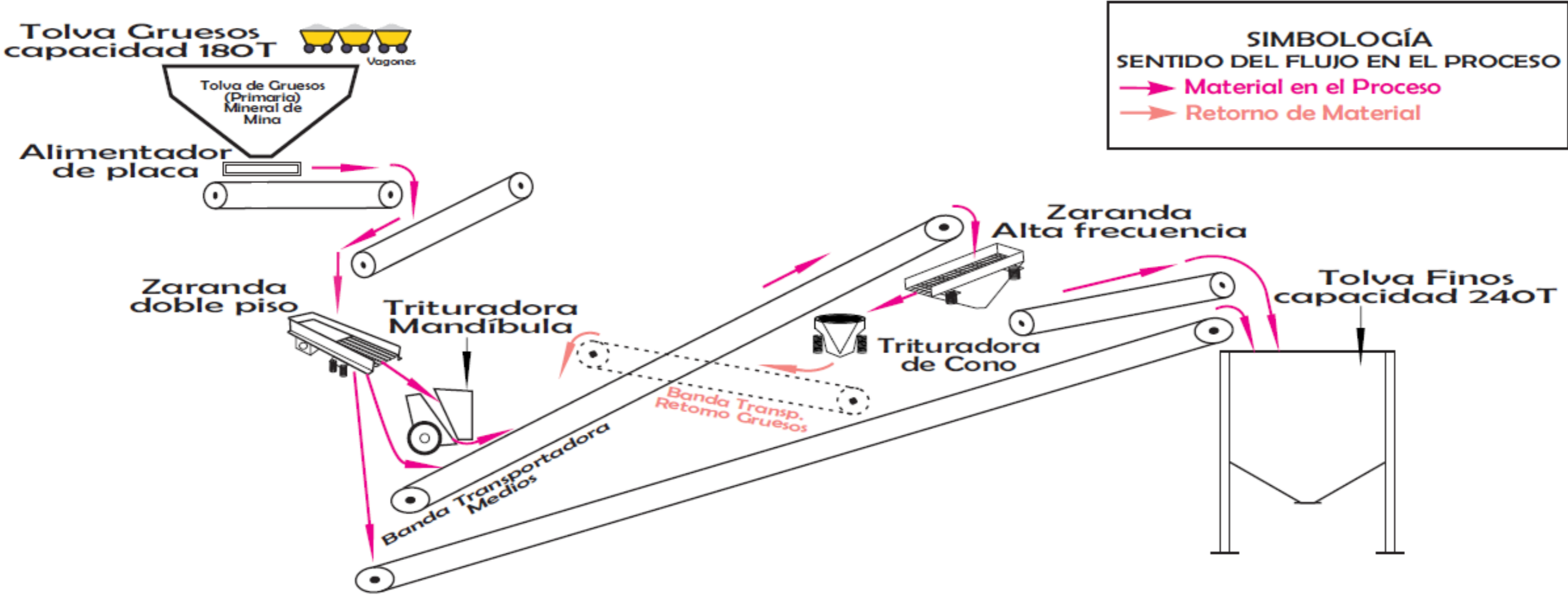


Diagrama de flujo Trituración

Fuente: Autores

APÉNDICE D

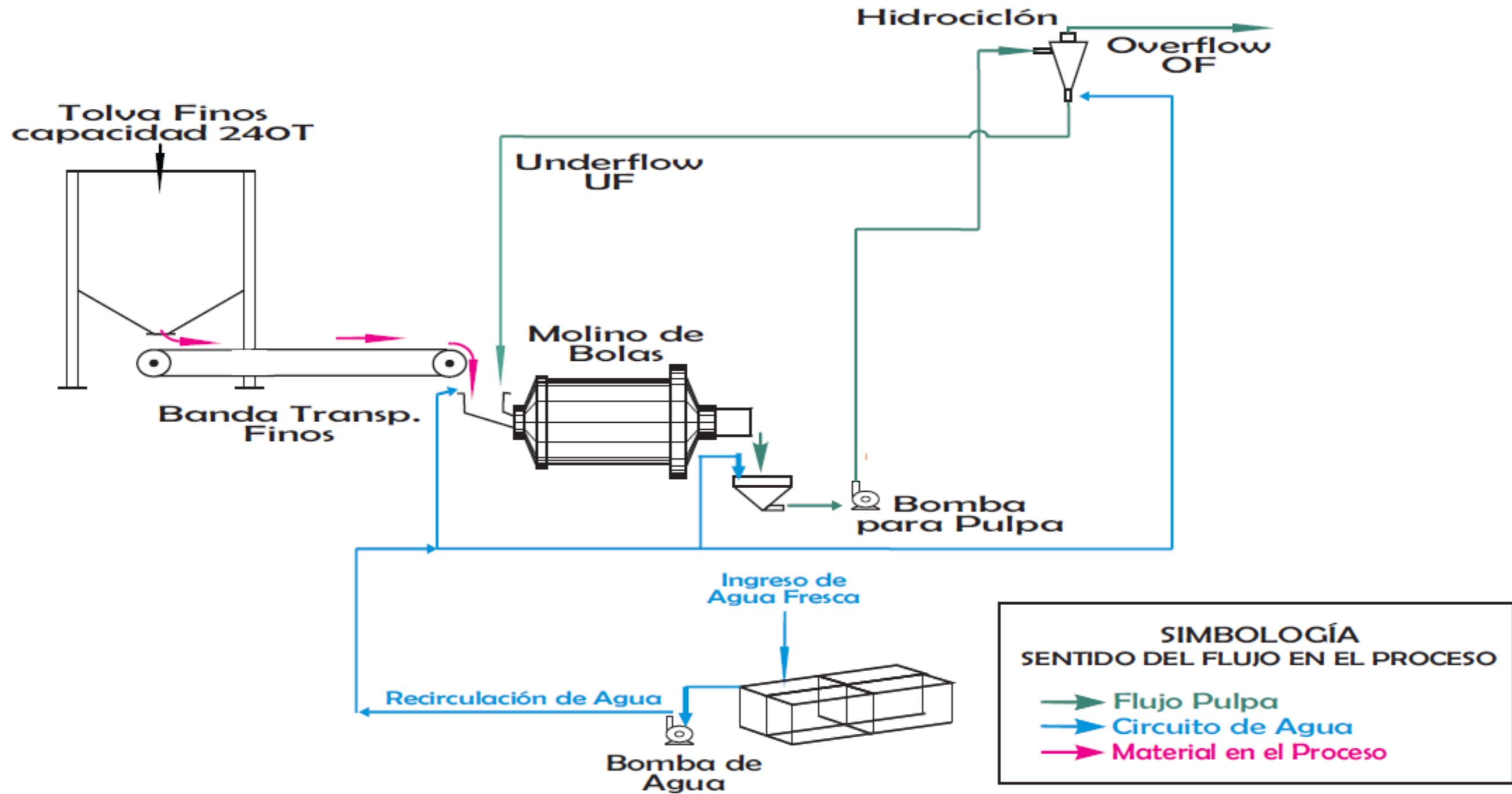


Diagrama de flujo Molienda

Fuente: Autores

APÉNDICE E

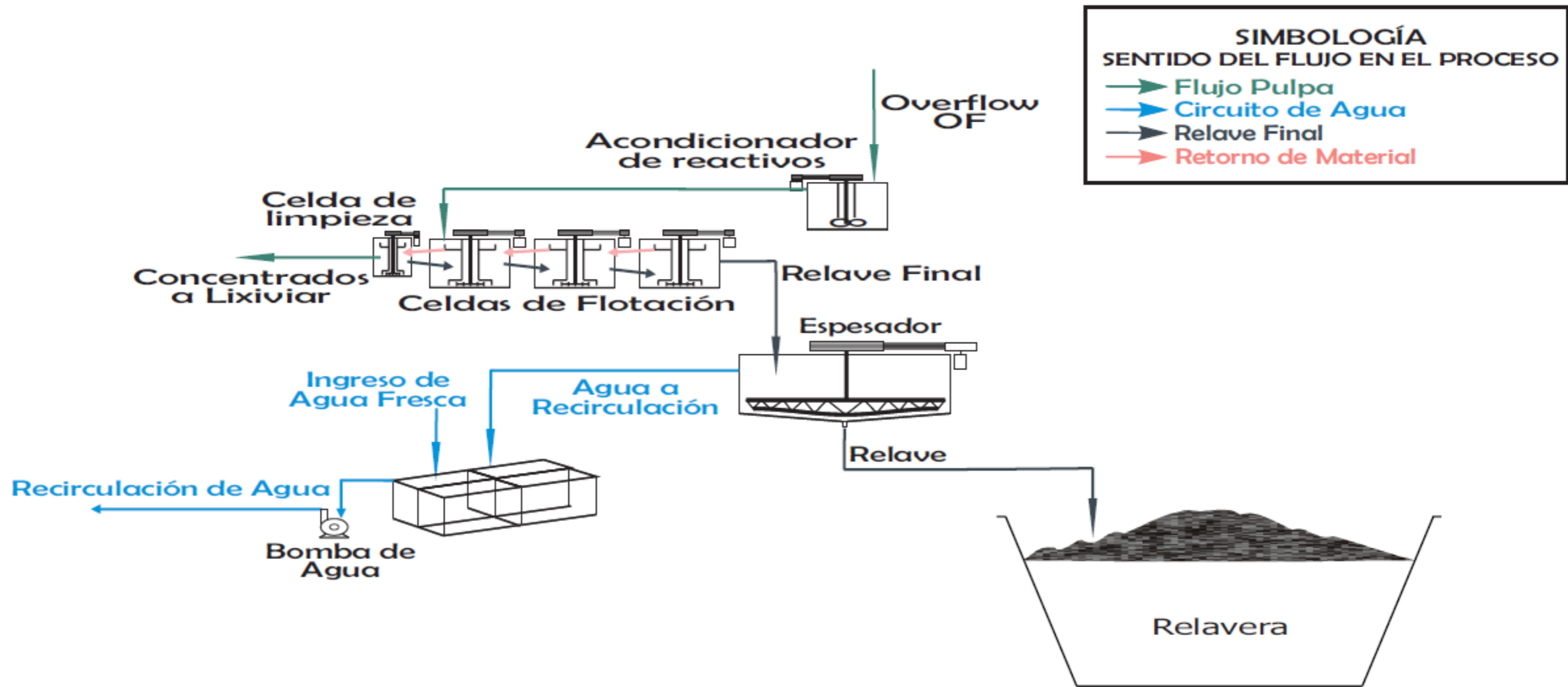
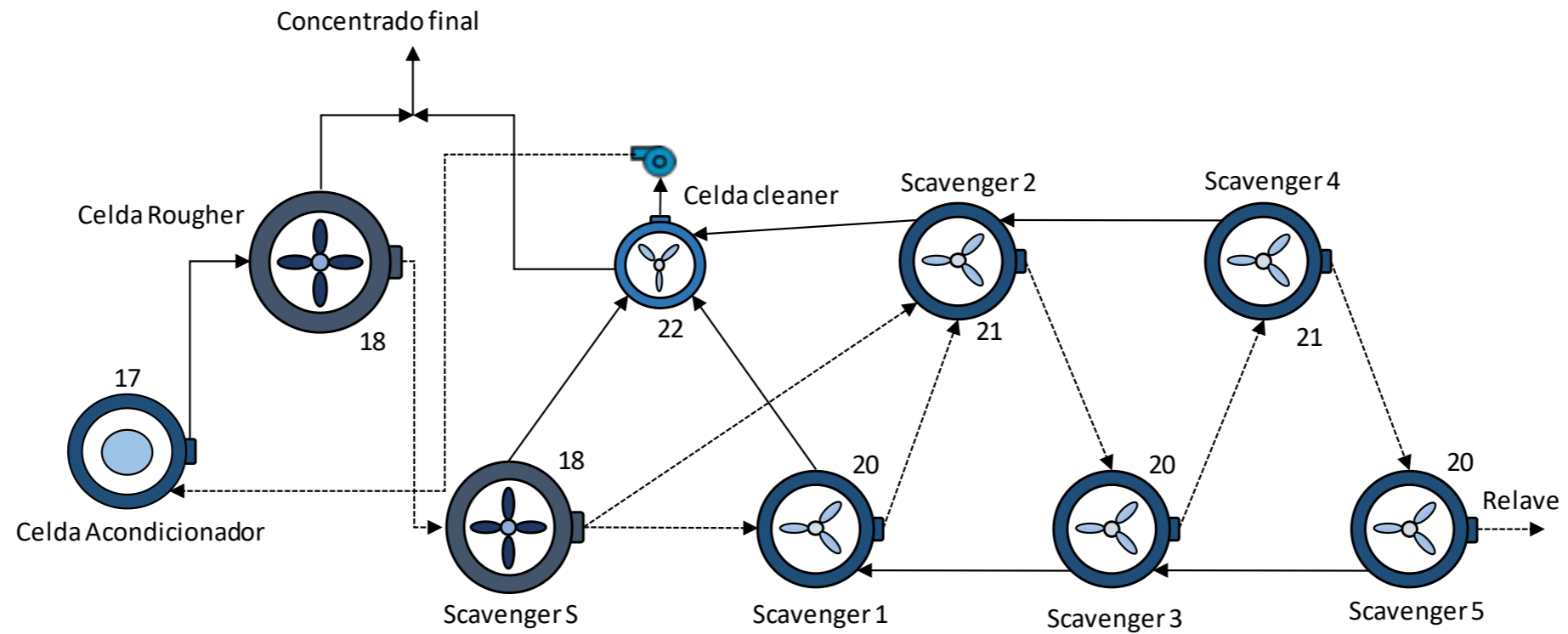


Diagrama de flujo Flotación

Fuente: Autores

APÉNDICE F

Circuito de flotación



LEYENDA

- 17 Tanque Acondicionador
- 18 Rougher - Celda tipo Serrano 8'x8'
- 19 Scavenger S - Celda tipo Serrano 7'x8'
- 20 Scavenger 1, 3, 5 - Celda tipo Serrano 7'x8'
- 21 Scavenger 2,4 - Celda convencional 7'x8'
- 22 Cleaner - Celda convencional 5'x7'

Fuente: Autores

APÉNDICE G

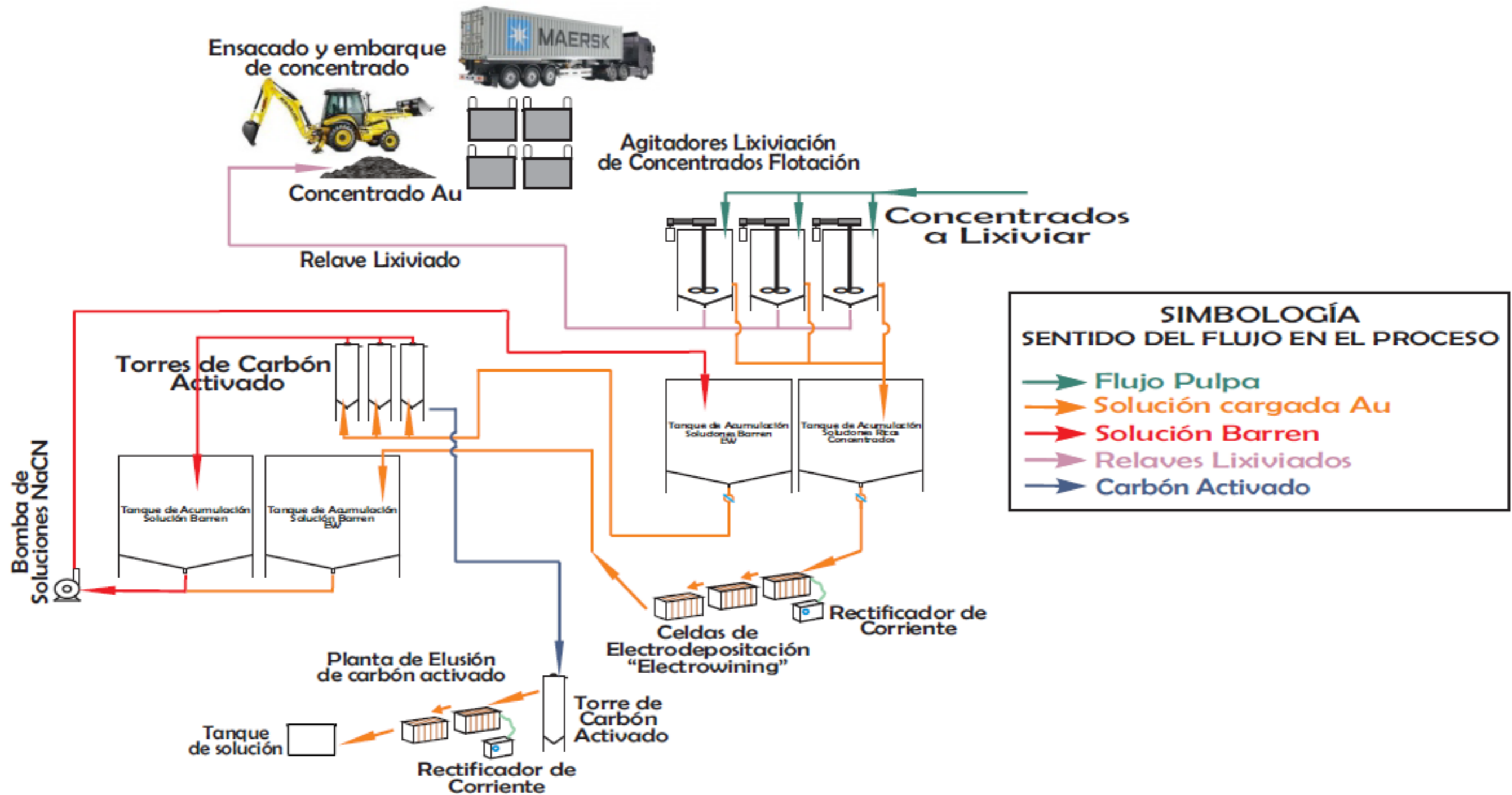
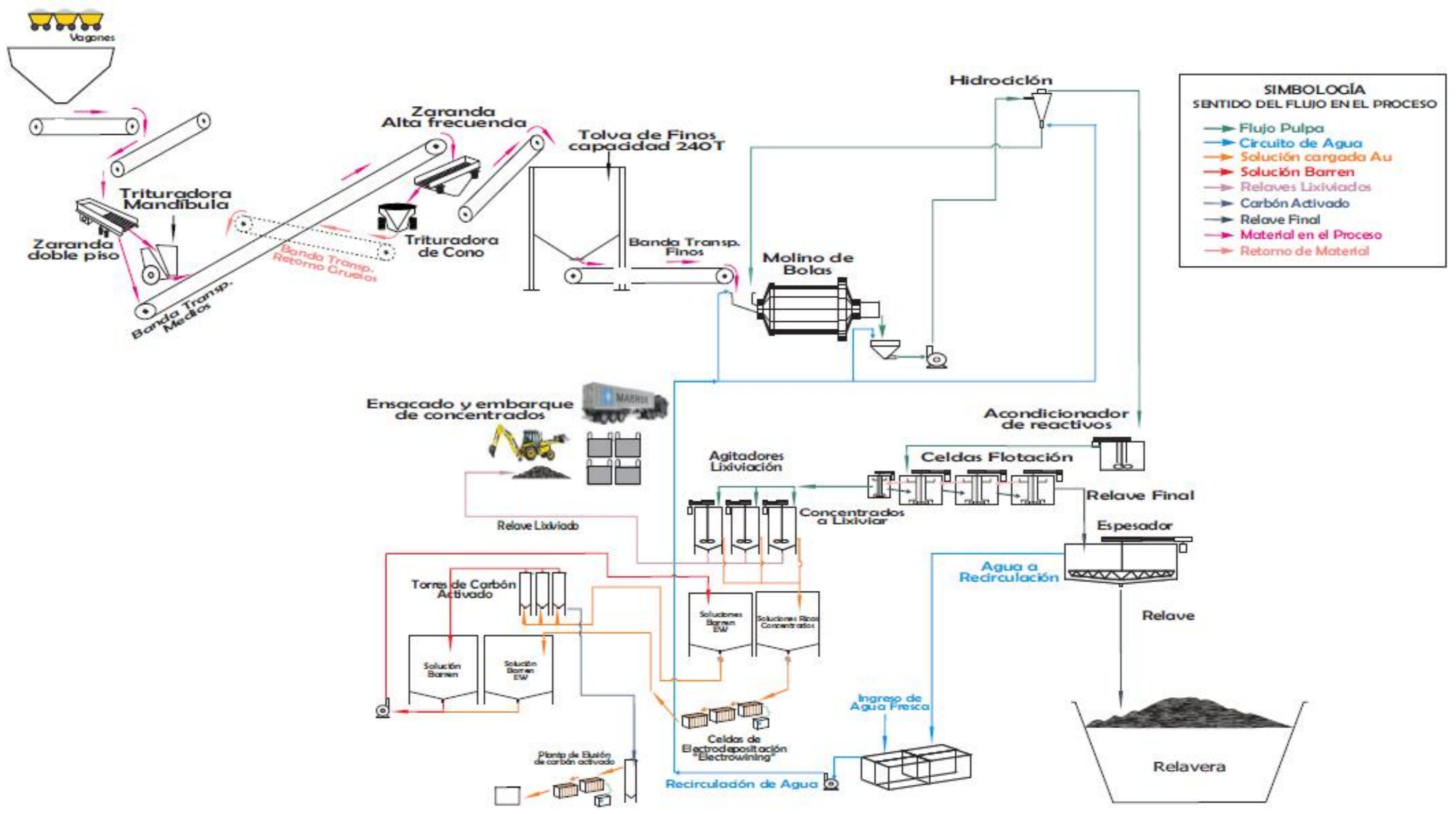


Diagrama de flujo Lixiviación

Fuente: Autores

APÉNDICE H



SIMBOLOGÍA	
SENTIDO DEL FLUJO EN EL PROCESO	
	Flujo Pulpa
	Circuito de Agua
	Solución cargada Au
	Solución Barren
	Relaves Lixiviados
	Carbón Activado
	Relave Final
	Material en el Proceso
	Retorno de Material

Diagrama de flujo SOMILOR S.A.

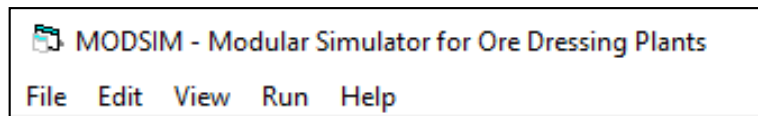
Fuente: Autores

APÉNDICE I

MANUAL MODSIM

Menú MODSIM

Cuando el programa es iniciado, aparecerá en la parte superior la barra de menús que gobierna todas las condiciones de operación para los flujogramas de plantas que se proponga simular. Se describen las operaciones principales del menú.

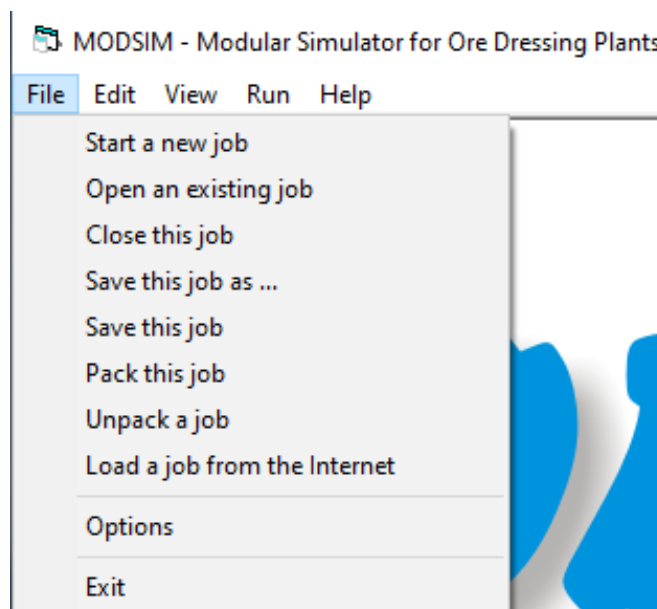


Menú MODSIM

Fuente: Autores

Menú File:

Los comandos de "File" permiten: iniciar un trabajo nuevo, abrir un trabajo existente que haya sido guardado, cerrar el trabajo actual o guardar el mismo. Además, la única forma de compartir un trabajo realizado por medio de internet es realizando una compresión con "pack this job", caso contrario no podrá ser revisado por otro usuario.

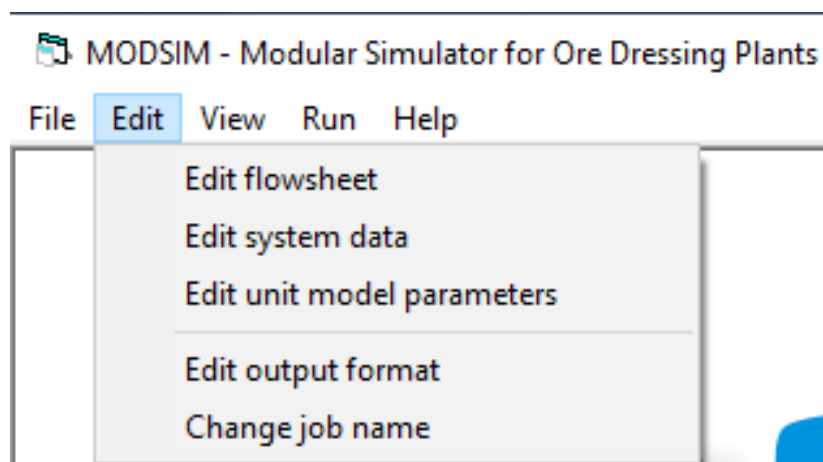


Menú File

Fuente: Autores

Menú “Edit”:

Los comandos de “Edit” admiten realizar cambios en el diagrama de flujo con el editor gráfico ya que mantiene un stock de diferentes equipos para escoger dependiendo el requerimiento de la planta (trituradoras, molinos, hidrociclones, bombas, etc.). También, incorporar datos de alimentación reconociendo características del mineral como su gravedad específica, mineralogía, tamaño máximo, flujo de ingreso, etc. Por último, modificar parámetros y unidades para los equipos y trabajar según el modelo matemático dependiendo de la cantidad de información que se encuentre a disposición.



Menú Edit

Fuente: Autores

Se tiene los distintos modelos para cada uno de los equipos disponibles en el paquete de MODSIM. En la tabla se observan los modelos de equipos disponibles en MODSIM.

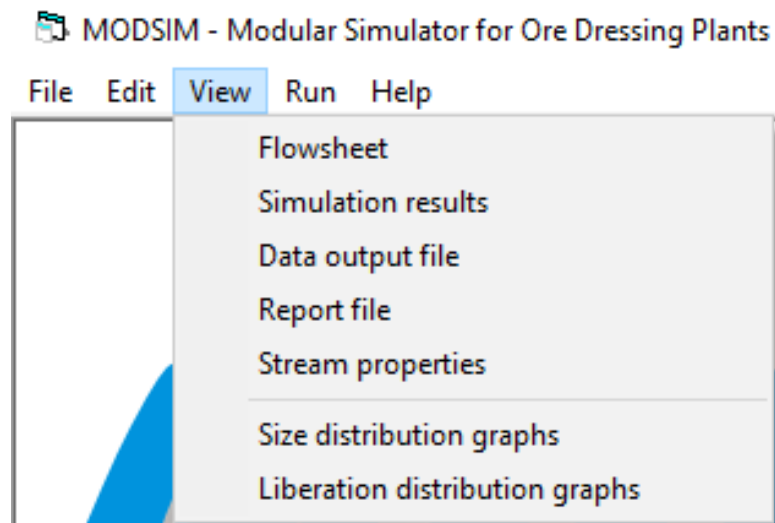
UNIDADES	MODELOS DISPONIBLES
Baño Drewboy	WASH, DREW
Baño en medio denso	TESK, BATJ, SLIP, CHAN, BAUJ, WENC, NORW, WASH, DREW
Bomba	NOP
Caja negra	BLBX
Caja pulsatoria Batac	BATJ
Caja pulsatoria Baum	BAUJ
Celdas de flotación	FLTK, FLTN, KLIM
Ciclón medio denso	DMCY, DMHC
Ciclón sólo de agua	WOCY
Cinta transportadora	CONV, MIXR
Clasificador espiral	CYCA
Concentrador Knelson	KNEL

UNIDADES	MODELOS DISPONIBLES
Cono de arenas Chance	CHAN
Cono Reichert	CONE
Cribas	SCRN, SCR1, SCR2, CYCA
Cribas curvas	SCR1, CYCB
Criba de agotado	DWSC
Criba de dos telas	DSC1, DSC2
Criba vibratoria	SHAK
Divisor de flujo	SPLT, SPL1
Dynawhirpool	DYNA
Elutriador	ELUT
Espesador	THIC, KYNC
Filtro	FILT
Hidrociclón	CYCL, CYCA
Mezclador	MIXR
Molino	MILL
Molino autógeno	FAGM, SAGM, MILL
Molino cónico	CRSH, CRS1, SHHD
Molino de bolas	MILL, GMIL, GMI1, GMSU, UMIL, HFMI, HFML, HFSU
Molino de rodillos	CRSH
Molino de rodillos de alta presión	CRSH
Molino giratorio	GYRA
Puddle pan	PAN1
Quebrantadora de mandíbulas	JAW1, JAW2
Separador espiral	SPIR, KELL, LIPS
Separador Norwalt	NORWA
Separador magnético	WDMS
Separador magnético húmedo de alta densidad	WHIM, DOFI
Separador Shallow	SLIP
Tanque	MIXR
Tambor Teska	TESK
Tambor Wenco	WENC
Tanque	MIXR
Tolva de alimentación	SEGB

Fuente: Autores

Menú “View”:

Los comandos “View” muestran los resultados de la simulación con sus respectivas salidas de datos y el diagrama de flujo finiquitado. Además, un archivo mostrando una tabla de la distribución de tamaño de grano y gráfico de la distribución para cualquier unidad del diagrama.

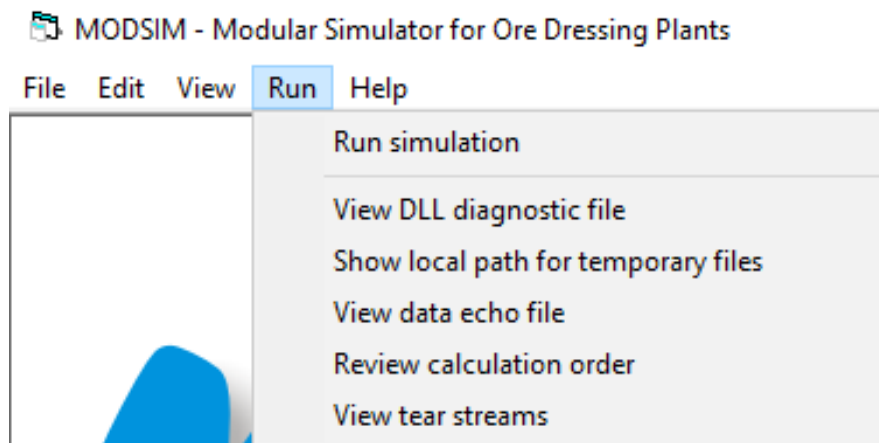


Menú View

Fuente: Autores

Menú "Run":

El comando "Run" permite ejecutar la simulación de un diagrama de flujo y advertir problemas en la misma.



Menú Run

Fuente: Autores

APÉNDICE J

Granulometría

GRANULOMETRÍA – CABEZA FLOTACIÓN					
INTERVALO	PESO	PESO	ABETURA	RETENIDO	PASANTE
(μ)	(g)	(%)	(μ)	(%)	(%)
> 150	109.95	11.60%	150	11.60%	88.40%
150-98	100.65	10.62%	98	22.21%	77.79%
98-75	113.97	12.02%	75	34.23%	65.77%
75-45	130.63	13.78%	45	48.01%	51.99%
< 45	492.92	51.99%	0	100.00%	0.00%
	948.12	100%			

Fuente: Autores

Se determina 5 tipos de partículas consideradas en la simulación, que son las proporciones entre los dos minerales definidos y los intervalos de tamaños del producto de ingreso al circuito.

Tipos de Partículas

Clases	Concentrado	Ganga	0/45	45/75	75/98	98/150
	%	%	%	%	%	%
1	1	0	0.8	0.50	0.80	0.20
2	0.83	0.17	0	0.30	0	0.70
3	0.50	0.50	0	0	0	0
4	0.17	0.83	0	0.20	0	0.10
5	0	1	99.20	99	99.20	99

Fuente: Autores

APÉNDICE K

Especificaciones de las celdas de flotación

N° Modsim	CELDAS	DIÁMETRO (m)	ALTURA (m)	Altura Rebalse (m)	Altura Espuma (m)	Altura Pulpa (m)	Vol. Total (m³)	Vol. Total (ft³)	Vol. Rebalse (m³)	Vol. Pulpa (m³)	Vol. Espuma (m³)	Franja Espuma (%)
1	S1	2.44	2.44	2.13	0.22	1.91	11.39	408	9.94	8.91	1.03	10.34%
2	S2	2.13	2.44	2.18	0.30	1.88	8.72	308	7.79	6.72	1.07	13.77%
8	Cleaner	1.40	2.00	1.81	0.33	1.48	3.08	109	2.79	2.28	0.51	18.23%
3	1	2.13	2.44	2.18	0.34	1.84	8.72	308	7.79	6.57	1.22	15.61%
4	2	2.13	2.44	2.19	0.36	1.83	8.72	308	7.82	6.54	1.29	16.45%
5	3	2.13	2.44	2.18	0.27	1.91	8.72	308	7.79	6.82	0.97	12.39%
6	4	2.13	2.44	2.19	0.42	1.77	8.72	308	7.82	6.32	1.50	19.19%
7	5	2.13	2.44	2.18	0.50	1.68	8.72	308	7.79	6.00	1.79	22.95%

Fuente: autores

APÉNDICE L

INGRESOS DE PARÁMETROS PARA CELDA DE FLOTACIÓN

Datos ingresados en Celda N°1

Specify parameters for model KLIM for unit 1

File

Specify the number of individual cells in this bank

Number of cells in this bank	1
Volume of each cell in this bank	9.94 <input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	10.34
Percent solids in the concentrate	38
Number of banks in parallel	1

Data set

New
 Current data
 Default

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min	
1	80	k1	1
2	50	k2	1
3	10	k3	1
4	8	k4	1
5	0	k5	1

Cancel Accept

Fuente: Autores

Datos ingresados en Celda N°2

Specify parameters for model KLIM for unit 2

File

Specify the number of individual cells in this bank

Number of cells in this bank	1
Volume of each cell in this bank	7.79 <input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	13.77
Percent solids in the concentrate	16
Number of banks in parallel	1

Data set

New
 Current data
 Default

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min	
1	10	k1	1
2	10	k2	1
3	10	k3	1
4	8	k4	1
5	0	k5	1

Cancel Accept

Fuente: Autores

Datos ingresados en Celda N°3

Specify parameters for model KLIM for unit 3

File

Specify the number of individual cells in this bank

Number of cells in this bank	1
Volume of each cell in this bank	7.79 <input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	15.61
Percent solids in the concentrate	10
Number of banks in parallel	1

Data set:

- New
- Current data
- Default

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type

G-class	Ultimate recovery %		Kinetic constant 1/min
1	10	k1	1
2	10	k2	1
3	10	k3	1
4	8	k4	1
5	0	k5	1

Cancel Accept

Fuente: Autores

Datos ingresados en Celda N°4

Specify parameters for model KLIM for unit 4

File

Specify the number of individual cells in this bank

Number of cells in this bank	1
Volume of each cell in this bank	7.82 <input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	16.45
Percent solids in the concentrate	14
Number of banks in parallel	1

Data set:

- New
- Current data
- Default

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type

G-class	Ultimate recovery %		Kinetic constant 1/min
1	10	k1	1
2	10	k2	1
3	10	k3	1
4	8	k4	1
5	0	k5	1

Cancel Accept

Fuente: Autores

Datos ingresados en Celda N°5

Specify parameters for model KLIM for unit 5

File

Specify the number of individual cells in this bank

Number of cells in this bank	1	
Volume of each cell in this bank	7.79	<input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	12.39	
Percent solids in the concentrate	16	
Number of banks in parallel	1	

Data set

New
 Current data
 Default

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	10	k1 1
2	10	k2 1
3	10	k3 1
4	8	k4 1
5	0	k5 1

Cancel Accept

Fuente: Autores

Datos ingresados en Celda N°6

Specify parameters for model KLIM for unit 6

File

Specify the number of individual cells in this bank

Number of cells in this bank	1	
Volume of each cell in this bank	7.82	<input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	19.19	
Percent solids in the concentrate	19	
Number of banks in parallel	1	

Data set

New
 Current data
 Default

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	10	k1 1
2	10	k2 1
3	10	k3 1
4	8	k4 1
5	1	k5 1

Cancel Accept

Fuente: Autores

Datos ingresados en Celda N°7

Specify parameters for model KLIM for unit 7

File

Specify the number of individual cells in this bank

Number of cells in this bank	1
Volume of each cell in this bank	7.79 <input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	22.95
Percent solids in the concentrate	16
Number of banks in parallel	1

Data set

New
 Current data
 Default

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	40	k1 1
2	40	k2 1
3	10	k3 1
4	8	k4 1
5	1	k5 1

Cancel Accept

Fuente: Autores

Datos ingresados en Celda N°8

Specify parameters for model KLIM for unit 8

File

Specify the number of individual cells in this bank

Number of cells in this bank	1
Volume of each cell in this bank	2.79 <input checked="" type="radio"/> m ³ <input type="radio"/> ft ³
Air holdup in the cells %	18.23
Percent solids in the concentrate	18
Number of banks in parallel	1

Data set

New
 Current data
 Default

Ultimate recovery and kinetic constant for each particle type

G-class	Ultimate recovery %	Kinetic constant 1/min
1	10	k1 1
2	10	k2 1
3	10	k3 1
4	8	k4 1
5	0	k5 1

Cancel Accept

Fuente: Autores