

DISEÑO DE UNA PLANTA DE 200 TPD PARA EL BENEFICIO DE MINERALES
POLIMETALICOS DE LA ZONA DE CALIFORNIA SANTANDER

LUISA FERNANDA SEGURA VIVIESCAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2020

DISEÑO DE UNA PLANTA DE 200 TPD PARA EL BENEFICIO DE MINERALES
POLIMETALICOS DE LA ZONA DE CALIFORNIA SANTANDER

LUISA FERNANDA SEGURA VIVIESCAS

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERA METALÚRGICA

Director

Walter Pardavé Livia

MAGISTER EN INGENIERÍA METALÚRGICA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2020

Dedicatoria

Primero se lo dedico a Dios por darme la fortaleza para cumplir y terminar este proceso académico, también este proyecto se lo dedico a mis papas, gloria amparo viviescas y Luis Fernando segura que son mi mayor motivación para seguir cada día durante todo este proceso y sin ellos nada de esto seria posible.

También a cada una de esos compañeros de la carrera como catalina por brindarme su amistad, Y mi novio Armando Jose Solorzano por ser mi apoyo incondicional.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 15 |
| 1.1 PROCESAMIENTO DE MINERALES | 15 |
| 1.2 REDUCCIÓN DE TAMAÑOS EN LOS MINERALES | 15 |
| 1.3 CONCENTRACION Y SEPARACION SÓLIDO – LÍQUIDO DE MINERALES | 16 |
| 1.4 MINERALES AURÍFEROS Y SUS CARACTERISTICAS | 17 |
| 2. OBJETIVOS | 19 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL | 19 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 19 |
| 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL | 20 |
| 3.1 BALANCES DE MASA DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE BENEFICIO DE MINERALES 200 TPD | 20 |
| 3.2 BALANCE DE MASA DE TRITURACIÓN | 20 |
| 3.3 BALANCE DE MASA DE LA MOLIENDA | 22 |
| 3.3.1 Balance de pulpa. | 23 |
| 3.4 BALANCE DE MASA DE FLOTACIÓN | 23 |
| 3.5 BALANCE DE MASA DE SEDIMENTACIÓN Y FILTRADO | 24 |

| | |
|--|----|
| 3.6 DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS PRINCIPALES DE LA PLANTA INDUSTRIAL DE BENEFICIO DE MINERALES AURIFEROS DE 200 TPD | 25 |
| 3.7 DIMENSIONAMIENTO PARA TRITURACIÓN PRIMARIA | 25 |
| 3.7.1 Cálculo de ancho mínimo de la abertura de alimentación (G). | 25 |
| 3.7.2 Longitud mínima de la carrera de mandíbula (e) | 25 |
| 3.7.3 Velocidad mínima de operación (<i>nop</i>) | 26 |
| 3.7.4 Dimensionamiento de trituradora de cono. | 26 |
| 3.7.5 Cálculo de potencia de Bond para las trituradoras. | 26 |
| 3.8 DIMENSIONAMIENTO DE REJILLA $\frac{3}{4}$ '' | 27 |
| 3.9 DIMENSIONAMIENTO DE ZARANDA $\frac{3}{4}$ '' | 27 |
| 3.10 DISEÑO DE ZARANDA MALLA 6 | 28 |
| 3.12 DIMENSIONAMIENTO DE CINTA TRANSPORTADORA | 28 |
| 3.13 DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA DE ACOPIO | 28 |
| 3.14 DIMENSIONAMIENTO DEL MOLINO | 29 |
| 3.15 DISEÑO HIDROCICLÓN | 31 |
| 3.16 DISEÑO DE PLANTA DE FLOTACIÓN | 31 |
| 3.16.1 Celdas para circuitos de flotación | 32 |
| 3.17 DIMENSIONAMIENTO DE SEDIMENTADORES Y FILTROS | 32 |
| 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 34 |

| | |
|--|----|
| 4.1 BALANCE Y DIAGRAMA DE FLUJO DE LAS ETAPAS DE LA PLANTA | 34 |
| 4.1.1 Sedimentación y filtrado | 36 |
| 4.2 DIMENSIONES DE EQUIPOS | 37 |
| 4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA EN 3D DE BENEFICIO DE MINERALES | 38 |
| 4.3 APLICATIVO APP PLABEMIN | 41 |
| 5. CONCLUSIONES | 42 |
| 6. RECOMENDACIONES | 43 |
| BIBLIOGRAFÍA | 44 |
| ANEXOS | 46 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Balance de pulpa | 23 |
| Tabla 2 Consumo específico de energía..... | 26 |
| Tabla 3 Resultados del índice de bond..... | 29 |
| Tabla 4 Apertura de bocas de carga-descargas de hidrociclón | 31 |
| Tabla 5 Volumen total de las celdas de flotación del circuito de cobre y pirita | 32 |
| Tabla 6 Dimensiones finales de los equipos principales y auxiliares | 37 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama de flujo de la etapa de trituración | 21 |
| Figura 2. Diagrama de flujo del sistema cerrado de molienda | 22 |
| Figura 3. Diagrama de flujo de etapa de flotación..... | 24 |
| Figura 4. Balance de masa de la etapa de trituración..... | 34 |
| Figura 5. Balance para el proceso de molienda..... | 35 |
| Figura 6. Balance de flotación..... | 36 |
| Figura 7. Planta de trituración en 3D | 38 |
| Figura 8. Planta de molienda en 3D..... | 39 |
| Figura 9. Planta de flotación en 3D..... | 39 |
| Figura 10. Sedimentadores en 3D | 40 |
| Figura 11. Filtros de prensa en 3D..... | 40 |
| Figura 12. Capturas de pantallas del aplicativo | 41 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|----|
| Anexo A Ensayos de laboratorio granulometría | 49 |
| Anexo B Resultados de trituración primaria | 49 |
| Anexo C Resultados de trituración secundaria | 50 |
| Anexo D Ecuaciones balance de molienda..... | 50 |
| Anexo E Balance de masa en porcentajes | 50 |
| Anexo F Balance de masa en porcentaje pirita | 51 |
| Anexo G Balance de sedimentación y filtrado cobre..... | 51 |
| Anexo H Balance de sedimentación y filtrado pirita..... | 51 |
| Anexo I. balance de sedimentación y filtrado relave..... | 52 |
| Anexo J Potencia del motor | 52 |
| Anexo K Factores de rejilla $\frac{3}{4}$ | 52 |
| Anexo L Factor de zaranda $\frac{3}{4}$ | 53 |
| Anexo M Zaranda malla # 6..... | 53 |
| Anexo N Datos cinta transportadora..... | 53 |
| Anexo O Datos planta de acopio..... | 54 |
| Anexo P Pruebas de laboratorio molienda..... | 55 |
| Anexo Q Factores de corrección para la potencia de bond | 55 |
| Anexo R Valores para potencia de un molino | 56 |
| Anexo S Valores dimensionamiento de molino de bolas | 56 |
| Anexo T Grafica cálculo de presión y diámetro hidrociclón | 57 |
| Anexo U Datos planta de flotación | 57 |
| Anexo V Dimensionamiento de sedimentadores..... | 58 |

ANEXO W Balance de flotación Balance de sedimentación y filtrado.....58

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UNA PLANTA DE 200 TPD PARA EL BENEFICIO DE MINERALES POLIMETALICOS DE LA ZONA DE CALIFORNIA SANTANDER

AUTORES: Segura Viviescas, Luisa Fernanda**

PALABRAS CLAVES: Beneficio de minerales, Dimensionamiento de equipos, Diseño planta industrial 3D

DESCRIPCIÓN: En este trabajo se realizó el diseño de una planta de beneficio de minerales de 200 TPD para la zona de california Santander Colombia, con diagramas de flujo que describe y establece las cinco etapas de los procesos operativos de cada fase de la planta, como son la trituración, molienda, flotación sedimentación y filtrado, donde se definió los balances de masa, también parámetros como rendimiento y recuperación; se dimensionó los equipos principales y auxiliares que conforman cada una de las cinco etapas; teniendo en cuenta las características del mineral a procesar.

Con los pasos anteriores ya definidos, se diseñó la planta de beneficio de minerales en 3D con un software llamado sketchup pro 2019 donde se determinó la distribución de la planta, se muestra cada uno de los equipos que conforman las etapas de la planta y la forma como se transporta el mineral, se creó una aplicación llamada PlBenMin, la aplicación fue desarrollada con el framework de ionic y angular, como desarrollo multiplataforma para dispositivos móviles. Donde se muestra una visión global del proyecto, siendo una aplicación informativa que tiene incluido planos, imágenes, etapas, definiciones que brindan un apoyo más fácil y didáctico para dar a conocer el proyecto.

*Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: Magister en ingeniería metalúrgica, Walter Pardave Livia

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A 200 TPD PLANT FOR THE BENEFIT OF POLYMETALLIC MINERALS IN THE CALIFORNIA SANTANDER AREA

AUTHORS: Segura viviescas, luisa fernanda **

KEYWORDS: Mineral benefit, Dimensioning of equipment, Design, industrial plant, 3D

DESCRIPTION: In this work, the design of a 200 TPD mineral beneficiation plant for the zone of California Santander Colombia was made, with flow diagrams that describe and establish the five stages of the operational processes of each phase of the plant, such as crushing, grinding, flotation, sedimentation and filtering. , where the mass balances were defined, also parameters such as efficiency and recovery; the main and auxiliary equipment that conform each one of the five stages were dimensioned; taking into account the characteristics of the mineral to be processed.

With the previous steps already defined, the 3D mineral beneficiation plant was designed with a software called sketchup pro 2019 where we determined the plant distribution, we showed each of the equipments that conform the stages of the plant and the way the ore is transported, we created an application called PlaBenMin, the application was developed with the ionic and angular framework, as a multiplatform development for mobile devices. Where a global vision of the project is shown, being an informative application that has included plans, images, stages, definitions that offer an easier and didactic support to present the project.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Magister en ingeniería metalúrgica, Walter Pardave Livia

INTRODUCCIÓN

California es un municipio colombiano ubicado en el departamento de Santander famoso por ser una zona rica en recursos hídricos y minerales como el oro y la plata; la zona muestra un considerable deterioro ambiental debido a que la minería se practica desde el año 1551. La minería ilegal ha sido la base del desarrollo de esta población, pero como en la mayoría de lugares en Colombia donde se realiza esta práctica ilegalmente se hace de forma artesanal y con un bajo nivel tecnológico.

En el proceso de minería ilegal no se implementan medidas ambientales para prevenir el daño a los recursos naturales; como en la extracción de minerales metálicos específicamente en el oro se utilizan sustancias químicas como el mercurio y el cianuro que sin adecuados controles lo que generan es un alto riesgo a al medio ambiente y a la salud humana. El impacto ambiental de la minería ilegal ha generado la contaminación de suelos con colas, gases; la minería ilegal se puede dimensionar con las cifras de la asociación colombiana de minería, de las cincuenta y cinco toneladas anuales de oro, solo siete corresponden a empresas, la mayoría con capital extranjero, que cumplen con los estándares y regulaciones aplicables al método extractivo; Esto indica que el 85% de la producción aurífera de Colombia corresponde sistemas de extracción ilegales.¹ Por esto el objetivo de este proyecto es el diseño de una planta de beneficio de minerales con una capacidad de 200 TPD en la zona de California Santander, que cuente con los estándares de calidad y tengan las etapas y procesos requeridos, como la trituración, molienda ,flotación, espesamiento y filtrado que están en una planta industrial y ayudan para

¹ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE MINERÍA-NORTON ROSE FULBRIGHT Colombia Mining Vision By 2025. Bogotá, Colombia [en línea] [fecha de consulta 07 2020] pág 20

combatir el desastre ambiental que es ocasionado por la minería ilegal; ya que los procesos actuales no han sido diseñados y se realizan por intuición o voluntad de trabajo que han generado pequeñas plantas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 PROCESAMIENTO DE MINERALES

Son los procesos físicos y químicos que tienen por objetivo obtener uno o más productos de minerales valiosos, para lo cual se hace uso de equipos diseñados y dimensionados; en las operaciones mineras es necesario una serie de procesos interconectados y el desempeño de cada etapa afecta a la siguiente.

Estos procesos preparan al mineral para la extracción del metal valioso en el caso de minerales metálicos, para producir un producto final comercial; el procesamiento de minerales comprende dos pasos principales que son la reducción de tamaño y la separación física que es la concentración del mineral ². En los minerales auríferos para poder concentrar el oro se necesita primero liberarlo ya que estos minerales se encuentran asociados a otros minerales.

1.2 REDUCCIÓN DE TAMAÑOS EN LOS MINERALES

La liberación del mineral valioso se logra por conminución, que tiene dos etapas la trituración y la molienda; la primera usa equipos como la trituradora de mandíbulas, funciona con una palanca con movimientos oscilatorios que presionan el mineral haciéndolo chocar con las paredes, esto es la trituración primaria y la secundaria es con la trituradora de cono, el mineral es aplastado o comprimido entre dos superficies; con las cribas se determina cuando el mineral no tiene un adecuado tamaño y se hace el proceso de realimentación hacia las trituradoras.

² WILLS, Barry A. y FINCH, James A.. *Wills' Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (8th Edition)*. Montréal, Canada : Butterworth-Heinemann, 2016 Pag 4

La segunda etapa de la conminución es la molienda se realiza en cilindros rotatorios y estos se clasifican en molinos de barras, bolas, guijarros, autógenos y semiautógenos; Los clasificadores normalmente se usan para cerrar el proceso de molienda y se utilizan para mejorar la eficiencia de reducción de tamaño, entre los clasificadores centrífugos está el hidrociclón y esta etapa reduce el mineral en tamaños que permiten que este se adhiera a burbujas en el proceso de flotación.

1.3 CONCENTRACION Y SEPARACION SÓLIDO – LÍQUIDO DE MINERALES

Una de las técnicas de separación física de los minerales es la concentración por flotación de espumas y usa como principio las propiedades superficiales de los minerales, si la superficie se moja fácilmente con agua es hidrofílica y si repele al agua es hidrofóbica, si es hidrofóbica la partícula se puede unir a la burbuja de aire y ser flotada.³ En un circuito de flotación se pueden encontrar cuatro etapas la primera es la etapa de recuperación rougher donde se logra grandes recuperaciones y se elimina la mayoría de la ganga, scavenger es la etapa que tienen como objetivo es recuperar el mineral valioso de las colas de el Rougher y las etapas de cleaner y recleaner tienen como función aumentar la ley de los concentrados del Rougher.

El espesamiento es una de las etapas de separación de sólido-fluido en el que las partículas sólidas se separan del líquido por la gravedad y la adición de floculantes aumenta la velocidad de sedimentación, las partículas se depositan en el fondo y se expulsan en forma de lodo; la etapa complementaria al espesamiento es la filtración, el producto final de una planta concentradora se obtiene con la separación del sólido del líquido por medio de un medio poroso que retiene el sólido y permite el paso del líquido, los filtros pueden ser filtros de vacío en esta categoría están

³ WILLS, Barry A. y FINCH, James A.. Wills' Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (8th Edition). Montréal, Canada : Butterworth-Heinemann, 2016 Pag 265

los filtros de tambor, de discos, de banda horizontal o los filtros de presión y en esta categoría están los filtros de prensa verticales.

1.4 MINERALES AURÍFEROS Y SUS CARACTERÍSTICAS

La mineralogía del oro de cada depósito es única debido a características que tiene como distribución de tamaño de grano de oro, el tipo de mineral huésped y ganga, los minerales que tiene asociados; la concentración promedio de oro en la corteza terrestre es aproximadamente 0.005g /t, y es mucho más baja que la mayoría de otros minerales como la plata (0.07 g/t) y cobre (50 g/t) y su presencia predominante de oro es como metal nativo⁴

En las consideraciones que se tienen a la hora del diseño del procesamiento de minerales, la mineralogía de un mineral tiene un papel clave y esto es aplicable en los minerales auríferos, entre los diferentes minerales que tiene el oro están : minerales de molienda libre, minerales oxidados, minerales ricos en plata, sulfuros de hierro, sulfuros de arsénico, sulfuros de cobre, sulfuros de antimonio y telurios cada una de los minerales que contienen oro tienen características mineralógicas especiales que pueden afectar su procesamiento

El oro se asocia a la pirita y el que se encuentra en la pirita puede ser oro libre u oro refractario, la pirita es un mineral del grupo de los sulfuros y debido a la naturaleza sulfúrica es difícil el proceso de flotación. Actualmente, el único colector que garantiza una buena flotación de sulfuro es el Xantato particularmente Xantato de potasio.

Los minerales que no aportan valor económico al proceso se dividen en dos grupos el primero es el de minerales de sulfuro que son los más comunes y otros minerales

⁴ DUNNE, Robert C;KAWATRA, S. Komar y YOUNG, Courtney A. SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME). Vol 1 e United States of America. 2019. Pags 12-13

como el selenio, bismuto, antimonio, y la segunda categoría son los minerales no sulfurados que son minerales que tienen sílice, silicatos y minerales de carbonato.⁵

⁵ Information Resources Management Association. Waste Management - Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. USA IGI Global.2020 Pag 277

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar el flujograma, los equipos principales y auxiliares de una planta de beneficio de minerales polimetálicos de 200 TPD en la zona de California Santander.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer el flujograma de la planta de beneficio de minerales auríferos
- Dimensionar los equipos principales y auxiliares del sistema de beneficio de minerales.
- Diseño en 3D de la planta de beneficio de minerales auríferos de 200 TPD.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 BALANCES DE MASA DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE BENEFICIO DE MINERALES 200 TPD

Para el diseño de la planta de beneficio de minerales auríferos de 200 TPD se diseñó el diagrama de flujo, donde se especifican equipos principales y auxiliares; estos diagramas se basaron en pruebas de laboratorio y datos previos; Para el diseño general de equipos y diagramas de flujo, se hace indispensable realizar los balances de masa de cada uno de los procesos involucrados.

3.2 BALANCE DE MASA DE TRITURACIÓN

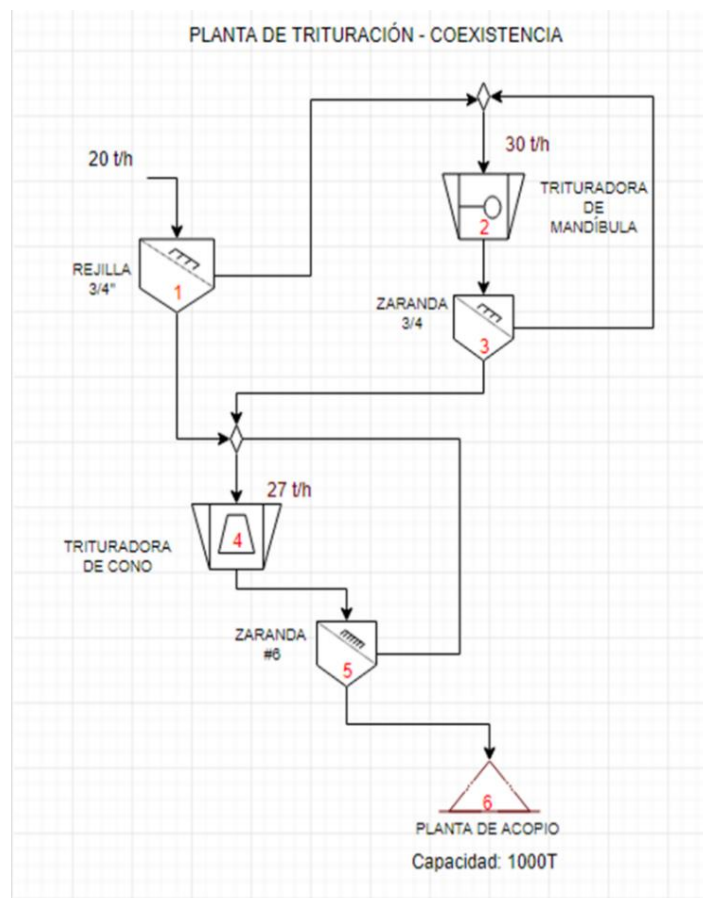
Las bases para la elaboración del circuito de trituración radican en los análisis granulométricos realizados que se pueden ver en el anexo A, datos que fueron proporcionados por el laboratorio previamente y por lo cual, es posible dimensionar los flujos de sólidos, las cribas y equipos.

Con el análisis granulométrico del anexo A, se determinó las etapas de trituración y molienda; para la etapa de trituración, se obtiene la información del anexo B Y C que son los análisis granulométricos de trituración primaria y la trituración secundaria; y se obtuvo información de la eficiencia de las trituradoras con un 61.79% para la trituradora de mandíbulas y con 74% para a trituradora de conos.

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo que es la primera etapa de la planta industrial; esta planta tiene un tiempo de operación de 10 horas y un procesamiento de 200 t/d es decir 20 t/h como se observa en el diagrama; el (numero 1) en la figura 1 es la entrada del mineral y es clasificado por una rejilla de $\frac{3}{4}$ '' ; el mineral que no pasa va a la trituradora de mandíbulas (numero 2), después de la trituración

primaria el alimento pasa por una zaranda (numero 3) y el mineral que pasa va directamente a la trituradora de cono(numero 4) que recibe alimento de la rejilla $\frac{3}{4}$ '' y de la primera zaranda; después de la trituración secundaria el alimento pasa por una segunda zaranda (numero 5) y de esta a la planta de acopio (numero 6).

Figura 1. Diagrama de flujo de la etapa de trituración

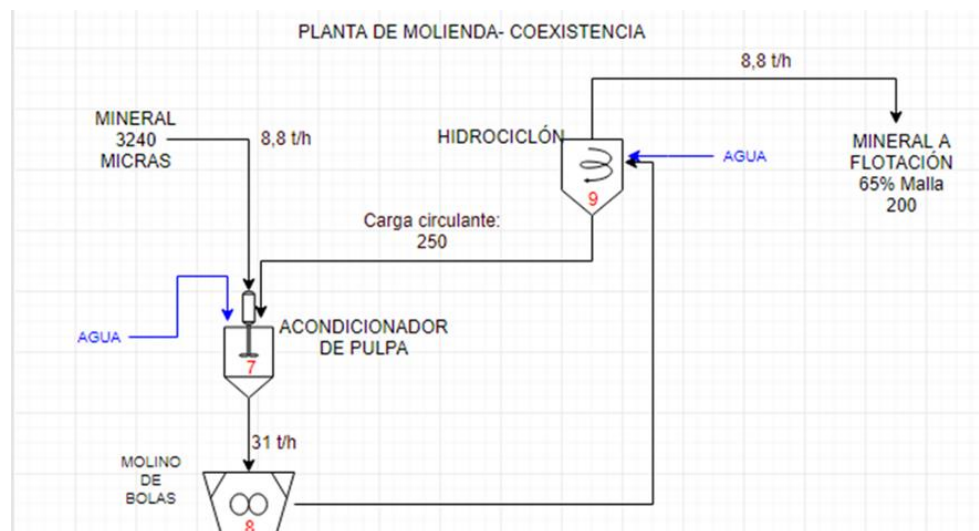


Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

3.3 BALANCE DE MASA DE LA MOLIENDA

La molienda es la última etapa en la que se disminuye el tamaño del mineral, en la figura 2 se muestra el diagrama de flujo de un circuito cerrado de molienda donde el tiempo de operación es de veinticuatro horas, el porcentaje de utilización de la planta es del 90% y se procesan 8,8 toneladas por hora; que entran en el acondicionador de pulpas (numero 7), la pulpa pasa al molino de bolas (numero 8) con un tipo de molienda húmeda con 70% sólidos, la clasificación se hace con un hidrociclón (numero 9) donde la carga recirculante regresa al acondicionador de pulpas.

Figura 2. Diagrama de flujo del sistema cerrado de molienda



Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

3.3.1 Balance de pulpa Se cálculo el porcentaje de sólidos y la densidad de la pulpa con las ecuaciones que se encuentran en el anexo D y los resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Balance de pulpa

| Descripción | % sólidos | Densidad de pulpa t/m ³ | Caudal m ³ /h |
|--------------------------|-----------|------------------------------------|--------------------------|
| Acondicionador de pulpas | 91% | 2.33 | 4 |
| Molino de bolas | 70% | 1.7 | 24.08 |
| Hidrociclón | 0.50% | 2.7 | 21.66 |
| Underflow | 0.80% | 1.23 | 15.11 |
| Overflow | 75% | 1.8 | 24 |

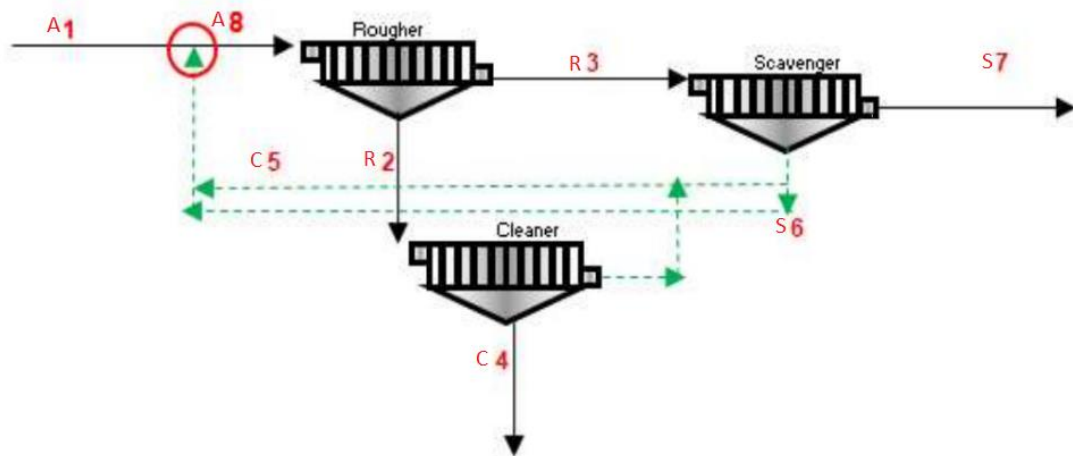
Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

3.4 BALANCE DE MASA DE FLOTACIÓN

El objetivo de la flotación es la alta recuperación del mineral de interés, para lograr esto la flotación tiene unas etapas que son la etapa primaria el rougher, la etapa de limpieza o cleaner y la etapa de barrido o scavenger.⁶ En la figura 3 se muestra estas tres etapas con el nombre que se le dio a cada corriente; A1: Alimento fresco a celda rougher, R2: Concentrado de salida de cleaner, salida R3: relave de rougher, alimento a scavenger, C4: Concentrado C5: Relave de cleaner, alimento a rougher S6: Concentrado de Scavenger, alimento a Rougher S7: Relave del circuito, A8: Alimento total al rougher con reciclo.

⁶ YOUNG, Courtney A. LUTTRELL, Gerald H. Separation Technologies for Minerals, Coal USA . Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME). (2012). Pag 526

Figura 3. Diagrama de flujo de etapa de flotación



Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Para el balance de masa del proceso de flotación se realizó matrices para encontrar los valores que van en cada corriente de esta etapa, los resultados están dados en unidades de t/día para un alimento de 200TPD y se pueden ver en el anexo E y F con estos valores se obtuvo la ley que tiene los metales en cada uno de los circuitos de cobre y pirita.

3.5 BALANCE DE MASA DE SEDIMENTACIÓN Y FILTRADO

En los sedimentadores se producen lodos que se hunden en el fondo de los tanques, por eso el concentrado final se separa de una pulpa; a esta etapa llegan tres productos de la flotación, concentrado de Cu, pirita y relave general; cada uno a su sedimentador y filtro correspondiente, en los anexos G, H, I se muestra el balance de los sedimentadores y filtros de la planta.

3.6 DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS PRINCIPALES DE LA PLANTA INDUSTRIAL DE BENEFICIO DE MINERALES AURIFEROS DE 200 TPD

El dimensionamiento de equipos es un paso importante para una optima eficiencia de la planta; a continuación, se dimensiona equipos principales y auxiliares.

3.7 DIMENSIONAMIENTO PARA TRITURACIÓN PRIMARIA

Para el diseño de la trituradora de mandíbulas se tienen encuentra los siguientes parámetros necesarios para su dimensionamiento. F80 152400 μm y P80 19000 μm dimensiones de la entrada y salida del alimento y se calculó la razón de reducción.

$$Rr = \left(\frac{D_{\text{max de alimentacion}}}{D_{\text{max de producto}}} \right) (\text{ecuación1}) \quad Rr = 8.02$$

3.7.1 Cálculo de ancho mínimo de la abertura de alimentación (G) El ancho minimo de la trituradora debe ser un 15% que el tamaño de la alimentación.

$$D_{\text{max alimentacion}} = 0.85 * G (\text{ecuación2}) \quad G = 18.63\text{cm}$$

3.7.2 Longitud mínima de la carrera de mandíbula (e) La longitud minima de Carrera de la mandibula movil dada por la siguiente expresión

$$e = 0.06 * G^{0.85} (\text{ecuacion 3}) \quad e = 14.38 \text{ mm}$$

3.7.3 Velocidad mínima de operación $n_{op} = 280 * 2.71^{(0.212*(G)3)} [rpm]$ (ecuación 4)

$$n_{op} = 279.62 [rpm]$$

3.7.4 Dimensionamiento de trituradora de cono Para el diseño de la trituradora de cono se tiene en cuenta los siguientes parametros F80 19000 μm y P80 3240 μm dimensiones de la entrada y salida del alimento respectivamente para la razón de reducción usando la ecuación 1 se tiene $R_r = 5.86$

3.7.5 Cálculo de potencia de Bond para las trituradoras Para saber el consumo específico de energía en Kw/ton molida se usa la ecuación

5 para el cálculo de la potencia de bond y los resultados se muestran en la tabla 2.

$$E \left(\frac{kWh}{t} \right) = 10 * w_i c * \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) f_s \text{ (ecuación 5)}$$

Donde el W_i es el índice de trabajo de Bond $\left(\frac{kWh}{t} \right)$; P_{80} y F_{80} son las dimensiones de salida y alimentación respectivamente (Tamaño de partícula que pertenece al 80% pasante) y F_s es el factor de seguridad que depende del tipo de trituradora, para trituradoras de mandíbulas 2 y para las de cono 1,3.

Tabla 2 Consumo específico de energía

| Eficiencia mecánica del triturador 85% | E(kWh/t) |
|--|----------|
| Trituradora de mandíbulas | 1.6 |
| Trituradora de cono | 2.2 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría y Segura L. 2019

Para el cálculo de la potencia del motor de cada trituradora se multiplica el consumo específico de energía por la cantidad de alimento que ingresa a la trituradora por hora; 28,3 t/h para la de mandíbulas y 26 t/h para la trituradora de cono los resultados se pueden ver en el anexo J. El motor de la trituradora de mandíbula que debe utilizarse es un motor de una potencia de 61 HP y para la trituradora de cono 77 HP

3.8 DIMENSIONAMIENTO DE REJILLA ¾"

Se requiere una rejilla que para una planta que triture 200 toneladas de mineral en 10 horas de operación con la siguiente ecuación.

$$\text{Área de zaranda} = \frac{u}{A \times B \times C \times D \times E \times F \times G \times H \times J} \text{ pies } 2 \text{ (ecuación 6)}$$

El factor u los valores de los factores A, B, C, D, E, F, G, H, J se encuentran en el anexo K y al reemplazar en la ecuación 10 tenemos un área de zaranda de 17.6 pies; por lo tanto, las medidas de la zaranda son 4 pies de ancho y 4 de largo.

3.9 DIMENSIONAMIENTO DE ZARANDA ¾"

Se requiere una zaranda para una trituradora de mandíbula que tritura 300 ton de mineral, Por lo tanto, reemplazamos los valores del anexo L en la ecuación (6) y se Obtiene el área de la zaranda es de 13.9 pies 2 por lo tanto las medidas de la zaranda, es 3 pies de ancho y 5 de largo

3.10 DISEÑO DE ZARANDA MALLA 6

La zaranda para la salida de la trituradora de cono que tritura 270 ton de mineral, Por lo tanto, reemplazamos los valores del anexo M en la ecuación (6) y se obtiene que el área de la zaranda es de 18.3 pies² y las medidas de la zaranda: Ancho 3 pies y Largo de la zaranda 5 pies

3.12 DIMENSIONAMIENTO DE CINTA TRANSPORTADORA

Los cálculos necesarios para establecer el dimensionamiento de las cintas transportadoras se presentan en las ecuaciones en el anexo N, al aplicar las ecuaciones se tiene que la capacidad de la banda es de 133676 m³/h, A1 es 1.38 m², A2 está en m² 0.6, b es 2.2 m y l es 0.7

3.13 DIMENSIONAMIENTO DE PLANTA DE ACOPIO

Se diseña una planta de acopio de mineral triturado; que tenga un buen funcionamiento para dar 5 días de libertad al proceso; la planta de acopio asegura el abastecimiento de la planta para que no se detengan las funciones.

$$\text{Tiempo de carga de la pila} = \frac{\text{masa seca del mineral}}{\text{alimento procesado por día}} = \frac{1051.640}{200T/D} = 5 \text{ dias (Ecuacion 7)}$$

Los datos del dimensionamiento del acopio están consignados en el anexo Ñ

3.14 DIMENSIONAMIENTO DEL MOLINO

Se determino el W_i del material para predecir el consumo energético de la molienda, con el índice de Bond o work index, el cual dice la facilidad con la que se lleva a cabo el proceso de molienda y este valor es obtenido con pruebas de laboratorio con un molino estándar y un circuito cerrado⁷, en el anexo O se muestran los resultados de este proceso, datos previos suministrados en el laboratorio.

El Índice de Bond es obtenido mediante la siguiente ecuación.

$$W_i = \frac{44.5}{p_{100}^{0.23} * Gbb^{0.82} * \left(\frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}} \right)} \text{ ecuacion (8)}$$

Donde P100: tamaño de corte de la criba (μm).; Gbp: índice de molturabilidad (g/rev), gramos de finos que se producen en el molino por cada vuelta; P80: tamaño correspondiente al 80% del pasante acumulado en los finos del último ciclo (μm); F80: tamaño correspondiente al 80% del pasante acumulado en la alimentación fresca (μm) el resultado se muestra en la tabla 3.

Tabla 3 Resultados del índice de bond

| | |
|--------------|---------|
| F80 | 625.468 |
| p80 | 288.640 |
| razon de red | 2.167 |
| Gbp | 5.029 |
| p100 | 150.0 |
| WI (kwh/Tc) | 19.802 |
| WI (kwh/T) | 21.828 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

⁷ MENÉNDEZ-Aguado, J.M., DZIOBA, B.R. & COELLO-VALAZQUEZ, A.L. Determination of work index in a common laboratory mill. Mining, Metallurgy & Exploration **22**, 173–176 (2005).

Se aplicó la formula (8) y se obtuvo como resultado el índice de bond 19.802 (Kwh/Tc). La energía necesaria para la molienda en un circuito cerrado viene dada por la expresión de bond corregida

$$W_B = 10 * Wi * \left(\frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{F80}} \right) \prod f \text{ ecuacion (9)}$$

Para el diseño del molino de descarga por rebose, se debe considerar; F80= 3240 μm, Malla #8, P80= 120 μm, 65% Malla 200, Wi = 19.802, donde sus factores de corrección se muestran en el anexo P. Aplicando los factores de corrección se tiene la siguiente ecuación que es la energía necesaria para la molienda

$$W_B(kW) = 10 * 19,8 * \left(\frac{1}{\sqrt{120}} - \frac{1}{\sqrt{3240}} \right) \prod (2,44/D)^{0,2} * \left(\frac{250^{0,1}}{CC} \right)$$

$$W_B = 224 * (2,44/D)^{0,2}$$

El cálculo analítico de la potencia de un molino se calcula y los valores se encuentran en el anexo Q

$$Pot(kW) = (3,832 * (fV_c) * D^{2,3} * l * (fV_{bol}) * \rho_{a,b} * \left(3,2 - 3fV_{bol} * \left(1 - \frac{0,1}{2^{9-10fV_c}} \right) + S \right) * fi$$

* f2 ecuacion (10)

$$Pot(KW) = 7,77 * D^{2,3} * L$$

Se igualan las dos expresiones de cálculo de potencia de la ecuación 9 y 10 se asignan valores de L/D y desarrolla en la tabla del anexo R. De acuerdo con las mejores condiciones de operación, se selecciona el molino de bolas con L/D =2. De ese modo, el molino requerido para el procesamiento del mineral corresponde a uno de diámetro 2,2 m y largo 5m y La potencia para el motor es de 227 kW.

3.15 DISEÑO HIDROCICLÓN

En el circuito de molienda, se presenta un caudal de entrada al hidrociclón de 21,66 m³/h es decir L/s; En el anexo S se obtiene, el diámetro del hidrociclón, (Dc) que es 4 y es la variable más importante a la hora del diseño ya que rige la relación con las demás variables las cuales dan el dimensionamiento final ⁸. En la tabla 4 se muestra los resultados

Tabla 4 Apertura de bocas de carga-descargas de hidrociclón

| Descripción | Formula |
|-----------------|-----------|
| Vortex | $Dc*0.35$ |
| Boca del ciclón | $Dc*0.25$ |
| Rango apex | $Dc*0.1$ |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

3.16 DISEÑO DE PLANTA DE FLOTACIÓN

Para el diseño de la planta de concentración por flotación, se requiere; circuito de Cu y un circuito de pirita con celdas rougher-scavenger-cleaner; cada uno. El uso de la planta de flotación es del 95% que es la medida del tiempo que el circuito de flotación está en operación y la razón de volumen efectivo es de 0.95

⁸ DUNNE, Robert C; KAWATRA, S. Komar y YOUNG, Courtney A. SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME). Vol 1 e United States of America. 2019. Pag 597

3.16.1 Celdas para circuitos de flotación Para saber la cantidad de celdas necesarias en cada etapa del circuito de flotación se usa la ecuación (20), donde el volumen por catálogo es 1 m³ y el volumen total de esta en la tabla 5, este volumen se calculo con los datos del anexo T

Tabla 5 Volumen total de las celdas de flotación del circuito de cobre y pirita

| Celda de flotación | Volumen |
|--------------------|---------|
| Rougher Cu | 1.31 |
| Scavenger Cu | 0.6 |
| Cleaner Cu | 0.83 |
| Rougher pirita | 1.4 |
| Scavenger pirita | 0.51 |
| Cleaner pirita | 0.92 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

$$Cantidad\ de\ celdas = \frac{Volumen\ total}{volumen\ de\ celda\ por\ catalogo} \quad \text{ecuación (11)}$$

La cantidad de celdas para el rougher Cu es 2, para el scavenger Cu es 1 y para el cleaner Cu es de 0.7 y se aproxima a 1; para el circuito de pirita es de 2 rougher, 1 cleaner y 1 scavenger

3.17 DIMENSIONAMIENTO DE SEDIMENTADORES Y FILTROS

Los espesantes y clarificadores generalmente se alimentan en el centro superior del sedimentador para esta etapa se requiere tres sedimentadores y tres filtros para los

productos de flotación que son del concentrado de cobre, pirita y relave, para el dimensionamiento de los sedimentadores se aplican la ecuación (12) y los resultados están en el anexo U

Area sedimentador = Area de la base X altura ecuacion (12)

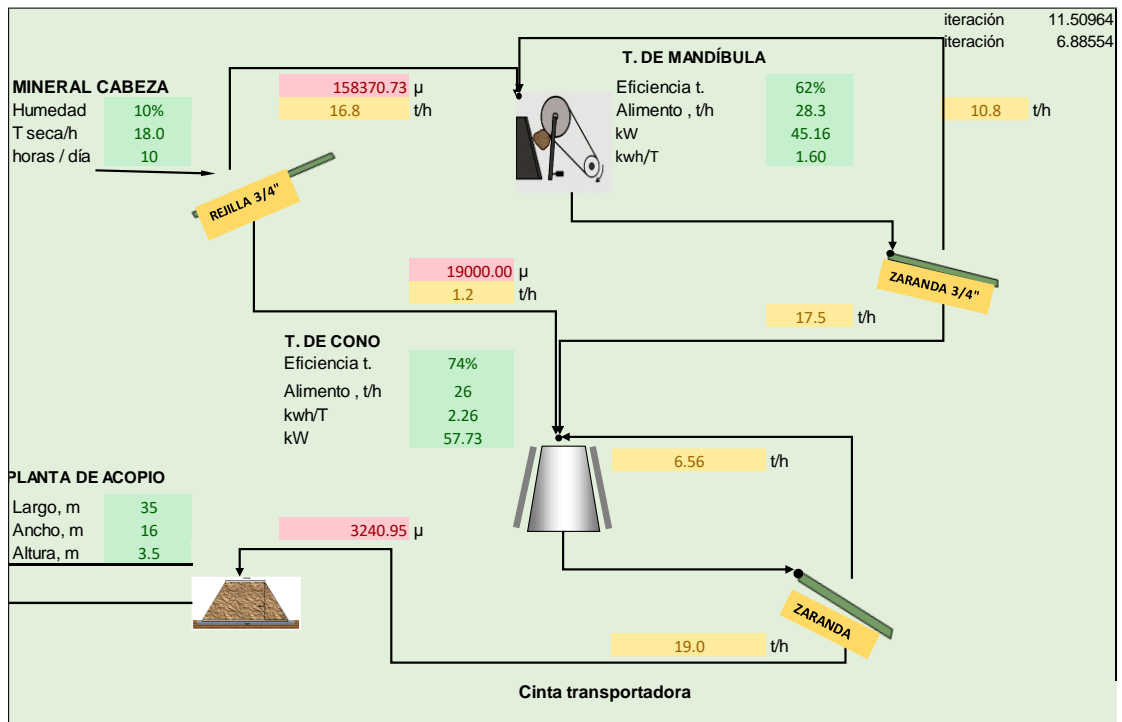
Se requiere entonces 3 sedimentadores: dos de 4 m de diámetro, y uno de 3,22m. Todos con altura de 2 m

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 BALANCE Y DIAGRAMA DE FLUJO DE LAS ETAPAS DE LA PLANTA

Con los datos obtenidos de los análisis granulométricos de los anexos A, B Y C fue posible la construcción de los balances de masa, que se resume en la figura 4. También se especifica, la eficiencia y la potencia de las trituradoras, que fueron calculadas en las secciones anteriores, el tamaño del mineral en cada circuito del diagrama de flujo y se muestra el mineral de cabeza que es 18 toneladas secas por hora con un 10% de humedad.

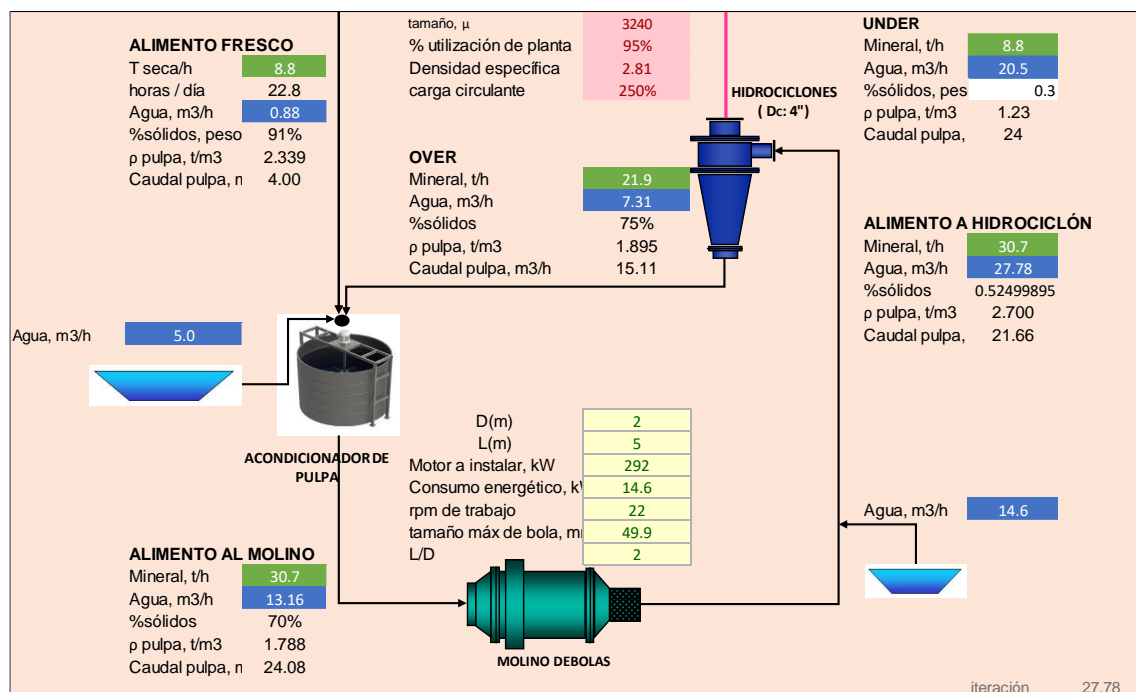
Figura 4. Balance de masa de la etapa de trituración



Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Con Los resultados que se registraron en la tabla 1 y figura 2 se construyó el balance de masa de la etapa de molienda que se resumen en la figura 5. Donde entra al acondicionador de pulpas 8.8 toneladas de mineral seco por hora; se especifica el caudal de la pulpa en cada una de las corrientes del diagrama de flujo, las dimensiones del molino de bolas que se calculó en la sección 3.14 y la cantidad de agua necesaria en esta etapa es de 19.591 m³/h siendo este valor la suma del agua que entra en el acondicionador y el hidrociclón.

Figura 5. Balance para el proceso de molienda

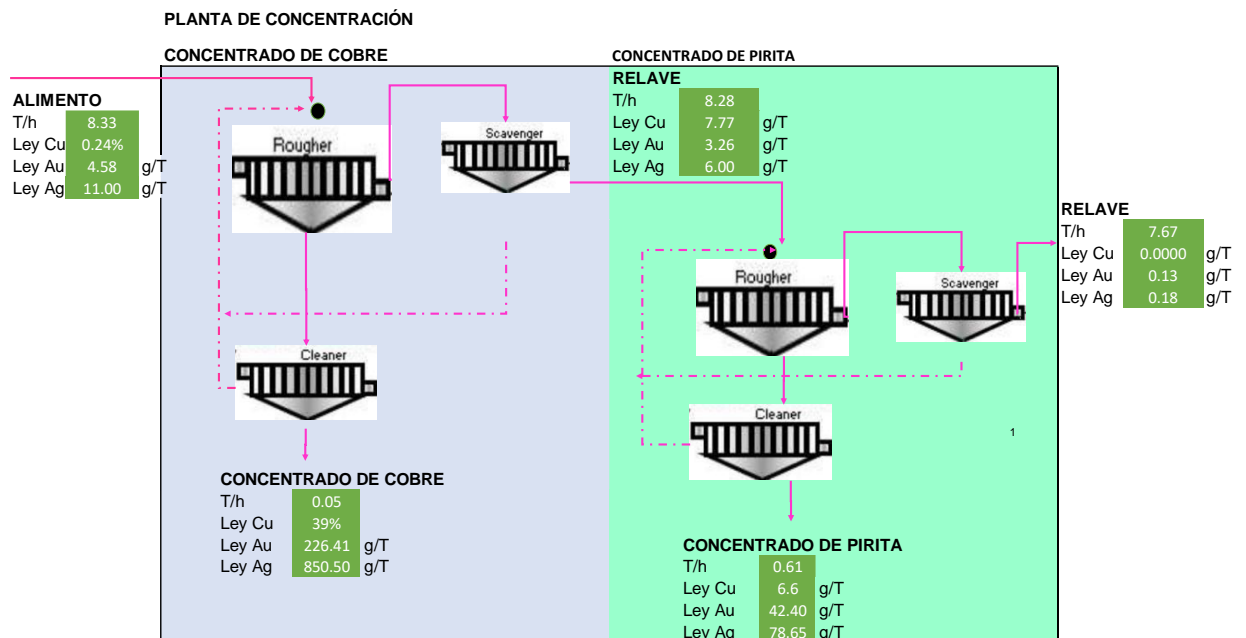


Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Con los anexos E. F y la tabla 5 se construyó el balance de masa de los circuitos de flotación de cobre y pirita que se resume en la figura 6. El cleaner del primer

circuito del proceso de flotación tiene un concentrado de cobre con ley de oro de 226,4 g/T, de plata de 850,5 g/T y el cleaner del segundo circuito, se obtiene, un concentrado de pirita con ley de oro de 42,4 g/T y de plata de 78,6 g/T. La cantidad total de agua necesaria según el balance que se resume en el anexo V. de la etapa de flotación es 21.54 m³/h.

Figura 6. Balance de flotación



Fuente: PARDAVÉ W., SANTAMARÍA y SEGURA L. 2019

4.1.1 Sedimentación y filtrado Con los datos de los balances de sedimentación y filtrado, se sumaron los resultados del volumen de agua que entra menos el volumen de agua que sale. Para los sedimentadores es de 14.09 m³/h de agua recuperada y para los filtros es de 4.05 m³/h; dando un total de agua recuperable

en este proceso es de 18,51 m³/h; pero se tiene encuentra un 10% de pérdidas de agua por evaporación y rebose dando 16,6 m³/h de agua que se recircula.

4.2 DIMENSIONES DE EQUIPOS

En la tabla 8 se resume las dimensiones finales de los equipos que conforman la planta de beneficio que fueron calculados en la sección

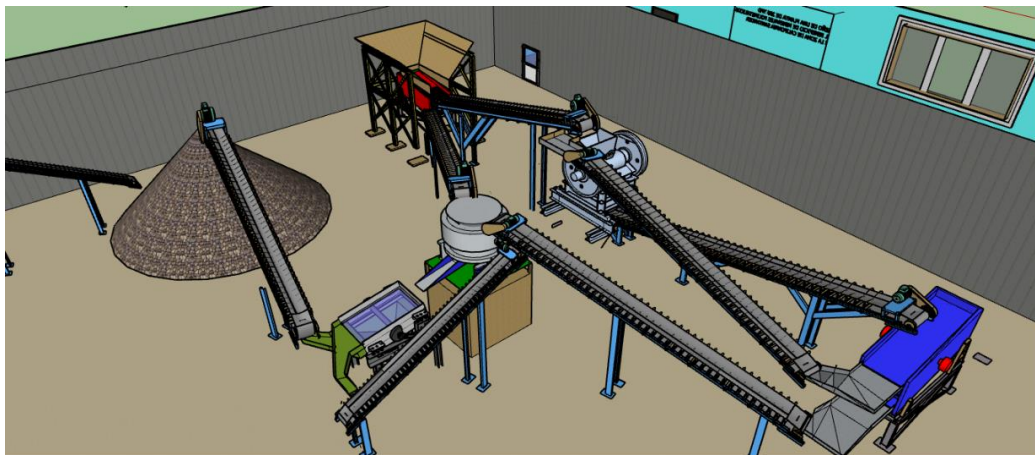
Tabla 6 Dimensiones finales de los equipos principales y auxiliares

| Equipo | Dimensionamiento de equipos | |
|-------------------------|---|--------------------------|
| Rejilla | Área 1.63 m ² | 1.2 m Ancho 1.2 Largo m |
| Trituradoras mandíbulas | Ancho mínimo de la abertura 0.18 | Motor 61 HP |
| Triturador cono | Rr 5.86 μ m | Motor 77 HP |
| Zaranda 3/4 | Área 1.2 m ² | Largo 1.5 m; Ancho 0.9 m |
| Zaranda malla 6 | Área 1.7 m ² | Largo 1.5 m; Ancho 0.9 m |
| Cinta transportadora | A1 1.38 m ² ; A2 0.06 m ² | |
| | B 2.2 m ² ; L 0.7 | |
| Acopio de mineral | Largo 35 m | Ancho 16 m; altura 35m |
| Molino de bolas | Diámetro 2.2. m Largo 5m | Motor de 227 K w |
| Hidrociclón | Vortex 0.014 m | Dc 4 |
| | Boca del ciclón 0.01 m | |
| | Rango ápex 0.004 m | |
| Celda de flotación | 4 Rougher 1 m ³ | 1 m ³ |
| | 2 scavenger 1 m ³ | |
| | 2 cleaner 1 m ³ | |
| Sedimentador | 1 sedimentador área 24.1 m ² | 4 m diámetro 2m altura |
| | 2 sedimentador área 24.1 m ² | 4 m diámetro 2m altura |
| | 3 sedimentador área 16.3 m ² | 3.2 m diámetro 2m altura |

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA EN 3D DE BENEFICIO DE MINERALES

Para el diseño de la planta de beneficio de minerales se usó Sketchup pro-2019 un software de diseño 3D, la planta se dividió en dos áreas la primera se ubica las oficinas, sala de juntas; la segunda está el sector donde se procesa minerales con un diseño de producción en U. El mineral entra en una caja alimentadora y va directo a una rejilla $\frac{3}{4}$ '' que está conectado a dos cintas transportadoras la primera lleva el alimento a la trituradora de mandíbulas y la segunda a la trituradora de cono. El alimento que sale de la trituración primaria se transporta en una cinta transportadora a la zaranda $\frac{3}{4}$ '' con un área de 1.2 metros cuadrados, el alimento que no pasa se recircula y el que pasa va a la trituradora de cono donde después pasa a una segunda zaranda con malla 6 y un área de 1.7 metros cuadrados, el alimento que no pasa es recirculado y el que pasa es transportado por una cinta al acopio de mineral que tiene un área de 560 metros cuadrados en la Figura 7 está la planta de trituración en 3D

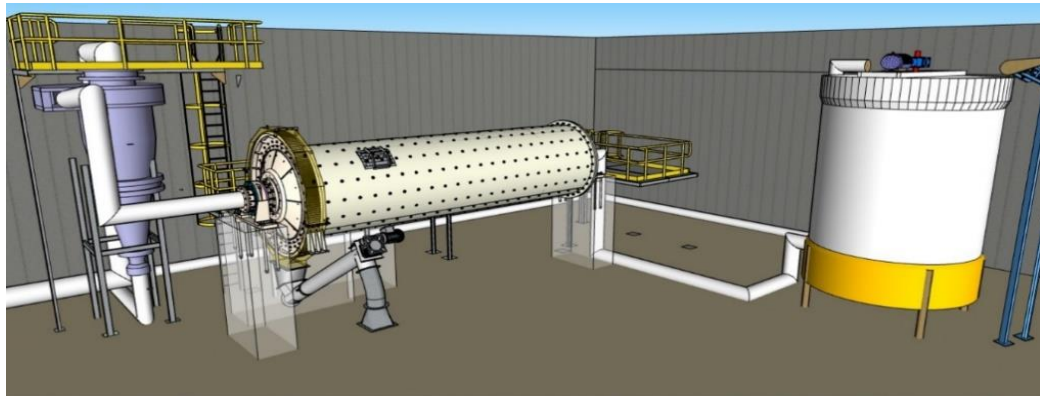
Figura 7. Planta de trituración en 3D



La segunda etapa es la molienda donde del de acopio el mineral es transportado en una cinta hasta el acondicionador de pulpas, después por tubería la pulpa pasa al molino de bolas seguido del hidrociclón, donde por el Overflow la pulpa es

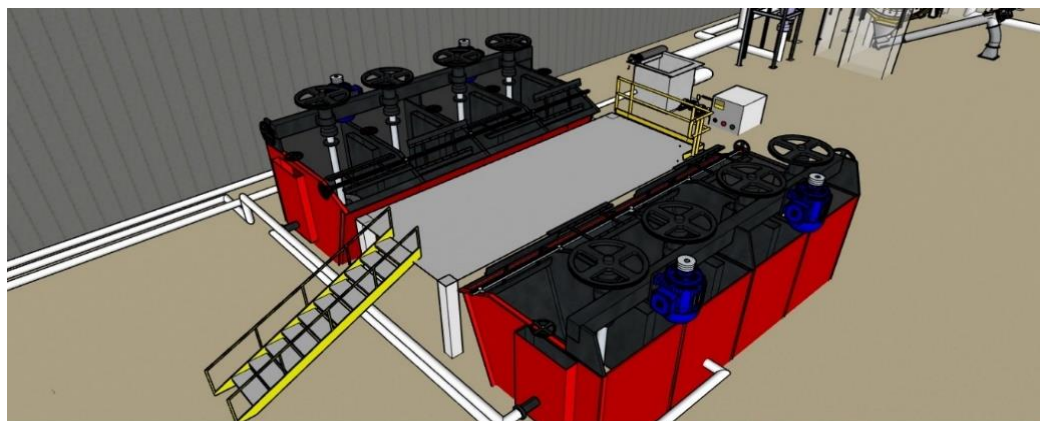
recirculada hasta el acondicionador y en el Underflow el alimento pasa a la siguiente etapa de flotación en la Figura 8 se puede ver la planta de molienda en 3D

Figura 8. Planta de molienda en 3D



En la etapa de flotación la pulpa entra a un tanque con reactivos y después a los circuitos; cuentan con tanques rectangulares, conectados en la configuración Abierta y oculta, la pulpa pasa primero al circuito de cobre y después al de pirita obteniendo tres clases de producto concentrado de cobre, pirita y relave en la Figura 9 siguiente se muestra.

Figura 9. Planta de flotación en 3D



Los productos que salen del proceso de flotación se transportan por tubería hacia los sedimentadores que son tres; el alimento entra por la parte superior del sedimentador y sale por el centro de la base del sedimentador en la Figura 10 esta los sedimentadores en 3D

Figura 10. Sedimentadores en 3D



La última parte de este procesamiento de minerales es el paso por los filtros que son 3, donde la pulpa se transporta por tubos hasta los filtros de prensa y al eliminar el agua de la pulpa esta es vaciada en unas cintas transportadoras que llevaran el mineral a su destino final en la planta de beneficio de minerales

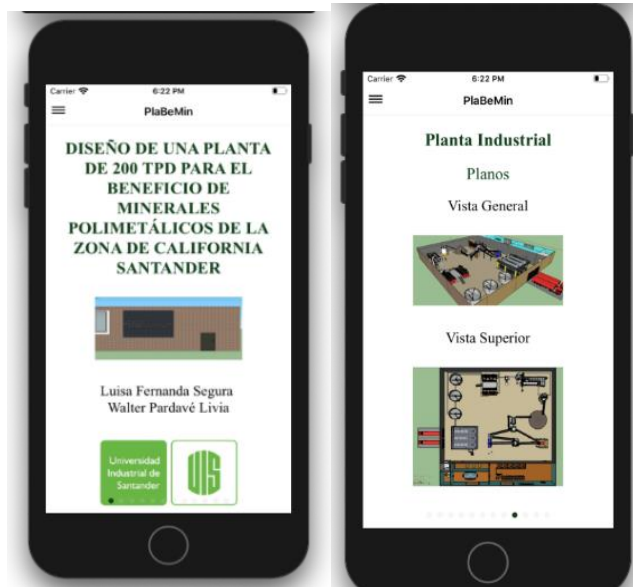
Figura11. Filtros de prensa en 3D



4.3 APLICATIVO APP PLABEMIN

Se desarrolló una aplicación App denominada PlaBeMin para una mejor visualización de la planta de beneficio de minerales, cuenta con sus etapas e imágenes, definiciones y planos, dando una visión global del proyecto en la Figura 12 se muestra algunas imágenes de esta aplicación

Figura 12. Capturas de pantallas del aplicativo



5. CONCLUSIONES

- Se realizó los diagramas de flujo de la planta de beneficio de minerales donde se estableció los procesos operativos de cada fase de la planta, y definió parámetros como rendimiento recuperación y calidad del producto.
- Se dimensionó los equipos principales y auxiliares de la planta, en los circuitos de trituración, molienda, flotación, sedimentación y filtrado.
- Se diseñó la planta de beneficio de minerales en tres dimensiones con el software sketchup pro-2019 donde se logra tener una completa visualización y se determinó la distribución de la planta.
- Se desarrolló el App PlaBeMin es una herramienta que permite un mejor manejo de la teoría, planos, equipos y sus dimensiones para una capacidad fija de 200TPD.

6. RECOMENDACIONES

Completar el desarrollo del App para que se pueda realizar el balance y el diseño de las etapas y la planta industrial de beneficio de minerales sin configuración fija.

Incluir asignaturas electivas que permitan diseñar procesos, equipos y plantas industriales en el campo de la metalúrgia extractiva, que permitan un perfil pragmático en la Carrera.

BIBLIOGRAFÍA

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE MINERÍA-NORTON ROSE FULBRIGHT Colombia. Mining Vision By 2025. Bogotá, [en línea] [fecha de consulta 07 2020] pag 20

AYALA MOSQUERA, Helcías José; CABRERA LEAL, Mauricio; CADENA GALVIS, Ana Judith; CASTAÑO URIBE, Carlos; CONTRERAS RODRÍGUEZ, Sandra Milena; DIAZ MUEGUE, Luis Carlos; ESPITIA PÉREZ, Lyda Marcela. Diagnóstico de la información ambiental y social respecto a la actividad minera y la extracción ilícita de minerales en el país. [en línea] 2020, págs 23-24

BOND, F.C. Crushing and Grinding Calculations. Allis Chalmers Manufacturing USA Co.: Milmwaukee, WI, 1961.

BOTIN, J.A. Sustainable Management of Mining Operations. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME). 2009.

DUNNE, Robert C ;KAWATRA, S. Komar y YOUNG, Courtney A. SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME). Vol 1. United States of America. 2019. Disponible en

<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSMEMPEM1/sme-mineral-processing/sme-mineral-processing>

GARCÍA, Marcelo H. Sedimentation Engineering - Processes; Measurements; Modeling; and Practice - ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice (MOP) No. 110. American Society of Civil Engineers (ASCE).

FLÁVIO, P. André, TAVARES, L. Simulating a laboratory-scale cone crusher in DEM using polyhedral particles, Powder Technology 02 -2020

MAGALHÃES, F., TAVARES L. Rapid ore breakage parameter estimation from a laboratory crushing test, International Journal of Mineral Processing 2013.

PEREZ, Pablo Fernando, La minería colonial en el páramo de Santurbán, el caso de Las Montuosas, Vetas y Páramo Rico. Academia Colombiana de Historia, Bogotá, Vol. 101, julio - 2014, págs. 520-528.

SINNOTT, Ray K. Towler, Gavin. Chemical Engineering Design - SI Edition (5th Edition). Elsevier. 2009.

YOUNG, Courtney A. TAYLOR, Patrick R. Anderson, CORBY G. Choi, Yeonuk. Hydrometallurgy Proceedings of the Sixth International Symposium. (SME).USA, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (2008) Pag 707

YOUNG, Courtney A. LUTTRELL, Gerald H.. Separation Technologies for Minerals, Coal USA . Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME). (2012). Pag 526

WILLS, Barry A. y FINCH, James A.. Wills' Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (8th Edition). Montréal, Canada : Butterworth-Heinemann, 2016.

ANEXOS

ANEXO A Ensayos de laboratorio granulometría del mineral de cabeza

| Malla ASTM | Dp (µm) | Peso Retenido (g) | % en peso retenido en cada tamiz | % en peso retenido acumulado | % en peso pasante acumulado |
|------------|----------|-------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 2 " | 50000.00 | 355.00 | 5.47 | 5.47 | 94.53 |
| 1 1/2 " | 37500.00 | 305.00 | 4.70 | 10.16 | 89.84 |
| 1 " | 25000.00 | 4642.00 | 71.47 | 81.63 | 18.37 |
| 3/4 " | 19000.00 | 753.00 | 11.59 | 93.22 | 6.78 |
| 1/2 " | 12500.00 | 203.00 | 3.13 | 96.35 | 3.65 |
| 3/8" | 9500.00 | 38.00 | 0.59 | 96.93 | 3.07 |
| 1/4" | 6300.00 | 102.50 | 1.58 | 98.51 | 1.49 |
| 4.00 | 4750.00 | 19.10 | 0.29 | 98.80 | 1.20 |
| 8.00 | 2360.00 | 27.50 | 0.42 | 99.23 | 0.77 |
| 16.00 | 1180.00 | 15.00 | 0.23 | 99.46 | 0.54 |
| 30.00 | 600.00 | 10.50 | 0.16 | 99.62 | 0.38 |
| 50.00 | 300.00 | 7.10 | 0.11 | 99.73 | 0.27 |
| 60.00 | 250.00 | 2.20 | 0.03 | 99.76 | 0.24 |
| 80.00 | 180.00 | 2.70 | 0.04 | 99.80 | 0.20 |
| 100.00 | 150.00 | 2.1 | 0.03 | 99.84 | 0.16 |
| 120.00 | 125.00 | 4.5 | 0.07 | 99.90 | 0.10 |
| 200.00 | 75.00 | 4.6 | 0.07 | 99.98 | 0.02 |
| <200 | 63.00 | 1.6 | 0.02 | 100.00 | 0.00 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Anexo B Resultados de trituración primaria

| Malla ASTM | Dp (µm) | Peso Retenido (g) | % en peso retenido en cada tamiz | % en peso retenido acumulado | % en peso pasante acumulado |
|------------|----------|-------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 2 " | 50000.00 | 21.00 | 6.63 | 6.63 | 93.37 |
| 1 1/2 " | 37500.00 | 48 | 15.16 | 21.79 | 78.21 |
| 1 " | 25000.00 | 38 | 12.00 | 33.79 | 66.21 |
| 3/4 " | 19000.00 | 14 | 4.42 | 38.21 | 61.79 |
| 1/2 " | 12500.00 | 22 | 6.95 | 45.15 | 54.85 |
| 3/8" | 9500.00 | 113 | 35.68 | 80.83 | 19.17 |
| 1/4" | 6300.00 | 18 | 5.68 | 86.52 | 13.48 |
| 4.00 | 4750.00 | 19 | 6.00 | 92.52 | 7.48 |
| 50.00 | 300.00 | 13 | 4.10 | 96.62 | 3.38 |
| 120.00 | 125.00 | 4.5 | 1.42 | 98.04 | 1.96 |
| 200.00 | 75.00 | 4.6 | 1.45 | 99.49 | 0.51 |
| <200 | 63.00 | 1.6 | 0.51 | 100.00 | 0.00 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

ANEXO C. Resultados de trituración secundaria

| Malla ASTM | Dp (µm) | Peso Retenido (g) | % en peso retenido en cada tamiz | % en peso retenido acumulado | % en peso pasante acumulado |
|------------|----------|-------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 5/8" | 19000.00 | 5.00 | 1.65 | 1.65 | 98.35 |
| 1/2 " | 12500.00 | 7.00 | 2.30 | 3.95 | 96.05 |
| 3/8" | 9500.00 | 5.70 | 1.88 | 5.82 | 94.18 |
| 1/4" | 6300.00 | 5.80 | 1.91 | 7.73 | 92.27 |
| 4.00 | 4750.00 | 7.00 | 2.30 | 10.04 | 89.96 |
| 6.00 | 3363.00 | 47.40 | 15.60 | 25.63 | 74.37 |
| 16.00 | 1180.00 | 55.60 | 18.30 | 43.93 | 56.07 |
| 30.00 | 600.00 | 42.00 | 13.82 | 57.75 | 42.25 |
| 50.00 | 300.00 | 38.60 | 12.70 | 70.45 | 29.55 |
| 60.00 | 250.00 | 36.70 | 12.08 | 82.53 | 17.47 |
| 80.00 | 180.00 | 16.70 | 5.50 | 88.02 | 11.98 |
| 100.00 | 150.00 | 12.8 | 4.21 | 92.23 | 7.77 |
| 120.00 | 125.00 | 10.3 | 3.39 | 95.62 | 4.38 |
| 200.00 | 75.00 | 9.6 | 3.16 | 98.78 | 1.22 |
| <200 | 63.00 | 3.7 | 1.22 | 100.00 | 0.00 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Anexo D Ecuaciones balance de molienda

$$\%de\ solidos = \frac{masa\ solidos}{masa\ de\ la\ pulpa} \quad \rho_{Pulpa} = \frac{100}{\frac{\%s}{\rho_s} + \frac{100-\%s}{\rho_l}}$$

$$Q = \frac{Masa\ de\ solidos}{densidad\ especifica}$$

ANEXO E Balance de masa en porcentajes de sólido para circuito de cobre

| | A1 | R2 | R3 | C4 | C5 | S6 | S7 | A8 |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| CU | 0.240% | 7.097% | 0.015% | 39.202% | 0.344% | 0.258% | 0.008% | 0.243% |
| AU | 0.00046% | 0.013% | 0.0001% | 0.023% | 0.000% | 0.001% | 0.0003% | 0.0005% |
| AG | 0.001% | 0.016% | 0.001% | 0.085% | 0.001% | 0.002% | 0.001% | 0.001% |
| PY | 9.000% | 8.292% | 8.927% | 7.157% | 8.532% | 6.119% | 9.011% | 8.906% |
| SIO2 | 50.000% | 46.597% | 50.165% | 29.493% | 50.201% | 51.576% | 50.122% | 50.050% |
| silicatos | 40.758% | 37.985% | 40.893% | 24.042% | 40.922% | 42.043% | 40.858% | 40.799% |
| | 100.000% | 100.000% | 100.000% | 100.000% | 100.000% | 100.000% | 100.000% | 100.000% |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

ANEXO F Balance de masa en porcentaje pirita

Balance de masa en Porcentajes de sólidos para el circuito de pirita

| | A1 | R2 | R3 | C4 | C5 | S6 | S7 | A8 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| CU | 0.008% | 0.004% | 0.008% | 0.0007% | 0.012% | 0.009% | 0.008% | 0.008% |
| AU | 0.000% | 0.003% | 0.0003% | 0.004% | 0.0001% | 0.0000% | 0.0000% | 0.000% |
| AG | 0.001% | 0.006% | 0.0000% | 0.008% | 0.0005% | 0.0000% | 0.0000% | 0.001% |
| PY | 9.011% | 71.765% | 3.569% | 96.322% | 16.358% | 20.240% | 2.027% | 10.086% |
| SIO2 | 50.122% | 15.548% | 53.121% | 2.019% | 46.072% | 43.936% | 53.970% | 49.530% |
| silicatos | 40.858% | 12.674% | 43.302% | 1.646% | 37.557% | 35.815% | 43.995% | 40.375% |
| | 100.000% | 100.000% | 100.000% | 100.000% | 100.000% | 100.000% | 100.000% | 100.000% |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

ANEXO G Balance de sedimentación y filtrado para el concentrado de cobre

| | Concentrado de cobre | Salida de sedimentador | Salida de filtro |
|---------------------|----------------------|------------------------|------------------|
| Mineral, t/h | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| Densidad especifica | 2.81 | 2.81 | 2.81 |
| % solidos | 0.23 | 0.6 | 0.9 |
| Densidad de pulpa | 1.17 | 1.63 | 2.38 |
| Volumen de pulpa m3 | 0.18 | 0.05 | 0.02 |
| Volumen de solidos | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Volumen de agua m3 | 0.17 | 0.03 | 0.01 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Anexo H balance de sedimentación y filtrado para el concentrado de pirita

| | Concentrado de pirita | Salida de sedimentador | Salida de filtro |
|---------------------|-----------------------|------------------------|------------------|
| Mineral, t/h | 7.67 | 7.67 | 7.67 |
| Densidad especifica | 2.81 | 2.81 | 2.81 |
| % solidos | 0.31 | 0.61 | 0.9 |
| Densidad de pulpa | 1.25 | 1.65 | 2.38 |
| Volumen de pulpa m3 | 19.96 | 7.63 | 3.58 |
| Volumen de solidos | 2.73 | 2.73 | 2.73 |
| Volumen de agua m3 | 17.23 | 4.9 | 0.85 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Anexo I balance de sedimentación y filtrado para el concentrado de relave

| | Concentrado de cobre | Salida de sedimentador | Salida de filtro |
|---------------------|----------------------|------------------------|------------------|
| Mineral, t/h | 7.67 | 7.67 | 7.67 |
| Densidad especifica | 2.81 | 2.81 | 2.81 |
| % solidos | 0.23 | 0.61 | 0.9 |
| Densidad de pulpa | 1.17 | 1.65 | 2.38 |
| Volumen de pulpa m3 | 2.27 | 7.63 | 3.58 |
| Volumen de solidos | 0.22 | 2.73 | 2.73 |
| Volumen de agua m3 | 2.05 | 4.9 | 0.85 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

ANEXO J Potencia del motor

| Trituradora | Potencia del motor | HP |
|-------------|--------------------|----|
| Mandíbula | 45.16 | 61 |
| Cono | 57.73 | 77 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Anexo k Factores de rejilla ¾"

20 t/h x 10231 = 22.0 STPH de alimento de material a la cubierta que es el factor u

| Letra | Factor rejilla | Descripción |
|-------|----------------|---------------------------------------|
| A | 3.08 | STPH que pasa por ft2 |
| B | 0.88 | % retenido de malla de clasificación |
| C | 0.43 | % de pasante < malla clasificación/ 2 |
| D | 1 | # de pisos |
| E | 1.3 | Tamizado en húmedo |
| F | 0.93 | Densidad lb/ft3 |
| G | 0.86 | Área cubierta malla |
| H | 1 | Abertura cuadrada |
| J | 1.35 | Eficiencia de malla |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Anexo L Factor de zaranda $\frac{3}{4}$

30.135 Ton/hora multiplicado por 1.10231 = 33,2 STPH malla de $\frac{3}{4}$ para la clasificación.

| Letra | Factor rejilla | Descripción |
|-------|----------------|---------------------------------------|
| A | 3.08 | STPH que pasa por ft2 |
| B | 1.2 | % retenido de malla de clasificación |
| C | 0.6 | % de pasante < malla clasificación/ 2 |
| D | 1 | # de pisos |
| E | 1.3 | Tamizado en húmedo |
| F | 0.93 | Densidad lb/ft3 |
| G | 0.86 | Área cubierta malla |
| H | 1 | Abertura cuadrada |
| J | 1.35 | Eficiencia de malla |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

ANEXO M Zaranda malla # 6

26,9 Ton/hora 1,10231= 29,6 STPH malla # 6 para la clasificación.

| Letra | Factor rejilla | Descripción |
|-------|----------------|---------------------------------------|
| A | 3.08 | STPH que pasa por ft2 |
| B | 0.79 | % retenido de malla de clasificación |
| C | 1.1 | % de pasante < malla clasificación/ 2 |
| D | 1 | # de pisos |
| E | 0.4 | Tamizado en húmedo |
| F | 0.93 | Densidad lb/ft3 |
| G | 0.86 | Área cubierta malla |
| H | 1 | Abertura cuadrada |
| J | 0.6 | Eficiencia de malla |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

ANEXO N Datos cinta transportadora

$$A1 = [0.25 \cdot \tan(\beta) \cdot [1 + (b - 1) \cdot \cos(\lambda)]] \text{ ecuacion (8)}$$

$$A2 = l1 \cdot \text{sen}(\lambda) \cdot [1 + l1 \cdot \cos(\lambda)] \text{ ecuacion(9)}$$

$$b = [0.9 * B - 0.05] \text{ ecuacion(10)}$$

$$l = [0.5 * (b - 1)] \text{ ecuacion (11)}$$

$$\text{capacidad de la banda} = [3600 * V * A * K] \text{ ecuacion (12)}$$

| Factor | Valor | |
|--------------------------------|---------|-------------------|
| Carga | 20000 | kg/h |
| Factor b | 2.2 | m |
| Factor ll | 0.75 | m |
| Angulo artesa λ | 38 | ° |
| Ancho de la banda b | 2.5 | m |
| Longitud de rodillos l | 0.7 | m |
| Angulo sobrecarga (β) | 25 | ° |
| Velocidad de la banda(v) | 2 | m/s |
| Angulo de inclinación ω | 17 | ° |
| Coficiente de reducción k | 0.94 | - |
| Sección A1 | 1.38 | m ² |
| Sección A2 | 0.60 | m ² |
| A1+A2= A | 1.97 | m ² |
| Capacidad de la banda | 13376.9 | m ³ /h |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Anexo O Datos planta de acopio

| Datos del acopio del mineral | | |
|------------------------------|----------|------------------|
| Angulo de reposo mx | 37 | ° |
| Ancho talud (b) | 4.645 | m |
| Largo efectivo base | 32 | m |
| Ancho efectivo base | 13 | m |
| Largo corona | 22.711 | m |
| Ancho corona | 3.711 | m |
| Área base | 416 | m ² |
| Área corona | 84.27 | m ² |
| Área talud largo | 95.74 | m ² |
| Área talud corto | 29.24 | m ² |
| Área total | 334.25 | m ² |
| Volumen pila | 802 | m ³ |
| Densidad aparente | 1.4568 | t/m ³ |
| Tonelaje pila | 1168 | t |
| Humedad | 10% | |
| Masa Seca Mineral | 1051.640 | t |
| Tiempo cargar pila | 5 | días |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

ANEXO P Pruebas de laboratorio molienda

| RESULTADOS WI | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------------|-------|------------|-------|---------------------------|------------------|------|
| Mineral en probeta, g | ciclo | retenido, g | %ret | pasante, g | %pas | #revoluciones próx. ciclo | g reales molidos | gbb |
| 1055.7 | 0 | 1047 | 99.18 | 8.70 | 0.82 | 100.00 | - | - |
| 1055.7 | 1 | 502.6 | 47.61 | 553.10 | 52.39 | 54.53 | 544.40 | 5.44 |
| 1003.5 | 2 | 747.7 | 74.51 | 255.80 | 25.49 | 61.12 | 251.67 | 4.61 |
| 1012 | 3 | 747.4 | 73.85 | 264.60 | 26.15 | 66.79 | 126.13 | 2.06 |
| 1028.8 | 4 | 766.9 | 74.54 | 261.90 | 25.46 | 74.97 | 190.17 | 2.85 |
| 1016.2 | 5 | 746.1 | 73.42 | 270.10 | 26.58 | 80.59 | 204.92 | 2.73 |
| 1008 | 6 | 731.1 | 72.53 | 276.90 | 27.47 | 83.82 | 210.23 | 2.61 |
| 997 | 7 | 619.2 | 62.11 | 377.80 | 37.89 | 63.20 | 307.13 | 3.66 |
| 1003 | 8 | 646.3 | 64.44 | 356.70 | 35.56 | 50.77 | 251.27 | 3.98 |
| 1018.1 | 9 | 606.4 | 59.56 | 411.70 | 40.44 | 35.87 | 270.81 | 5.33 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Anexo Q Factores de corrección para la potencia de bond

| Factor de corrección | Condición | Corrección |
|----------------------|--|--|
| F1 | Circuito cerrado | 1 |
| F2 | Molienda húmeda | 1 |
| F3 | Eficiencia de diámetro $D > 3.96$ | $(2,44/D)^{0.2}$ |
| F4 | Sobre tamaño de alimento si $F80 > 4000 * \sqrt{\frac{1.1 * 13}{Wi}}$ | $\frac{Rr + (Wi - 7)(f80 - f0)}{Rr * f0}$ |
| F5 | Por molienda fina si $P80 < 75 \mu m$ | $\frac{p80 + 10,3}{1,145 * p80}$ |
| F6 | Cuando la razón $F80 / P80 < 6$ | $\frac{2 * (Rr - 1.35) + 0,26}{2 * (Rr - 1.35)}$ |
| F7 | Para una carga circulante (250/CC) $\wedge 0,1$ | 250 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

ANEXO R Valores para potencia de un molino

| | | |
|--------------|------|--|
| fVc | 0.7 | Los valores de carga están entre 60-70% |
| fVmol | 0.4 | Los valores de llenado están entre 38 y 45% |
| fVb | 0.6 | La fracción de masa ocupada por los medios de molienda |
| fVbol | 0.24 | fVmol/fVb |
| $\rho_{a,b}$ | 4.71 | t/m ³ |
| fVm | 0.4 | La fracción de masa ocupada por el mineral |
| ρ_m | 2.71 | t/m ³ |
| S | 0 | Considerando que $D < 3,3m$ |
| F1 | 1 | Descarga de rebose en húmedo |
| F2 | 1.06 | Forros usados |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

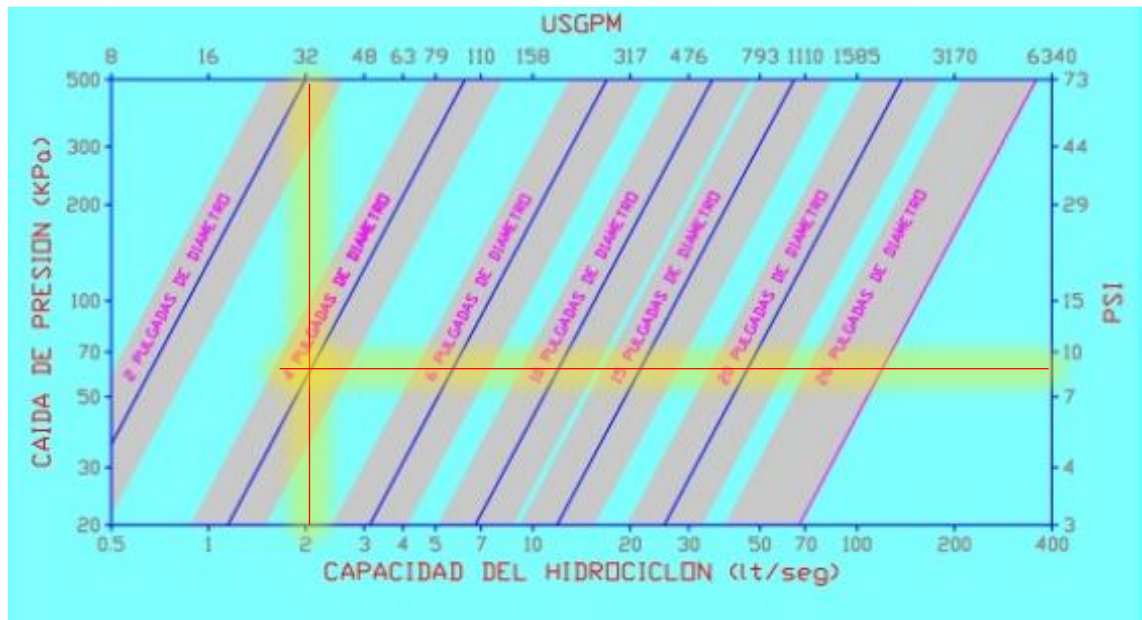
Anexo S Valores dimensionamiento de molino de bolas

Donde al igualar las dos expresiones de cálculo de potencia, de ese modo, asignando valores L/d

| CC | L/D | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 250 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 |
| D(m) | 3.35 | 2.75 | 2.45 | 2.26 | 2.12 | 2.01 | 1.92 |
| L(m) | 1.86 | 3.06 | 4.08 | 5.01 | 5.88 | 6.70 | 7.48 |
| KW | 210.32 | 218.81 | 223.94 | 227.65 | 230.57 | 232.99 | 235.05 |
| Motor a instalar, kW | 270 | 281 | 287 | 292 | 296 | 299 | 301 |
| V int. del molino, m ³ | 10.75 | 11.87 | 12.58 | 13.11 | 13.53 | 13.89 | 14.20 |
| rpm de trabajo | 18 | 20 | 21 | 22 | 22 | 23 | 23 |
| tamaño máx de bola, mm | 46.7 | 48.3 | 49.2 | 49.9 | 50.4 | 50.9 | 51.2 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

ANEXO T Grafica cálculo de presión y diámetro hidrociclón



Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Anexo U Datos planta de flotación

| | | |
|-------------------------|------------|--------------------|
| Densidad sólido | 2.71 | ton/m ³ |
| Densidad líquido | 1 | ton/m ³ |
| % solidos | 31% | % |
| Densidad de la pulpa | 1.239 | ton/m ³ |
| Caudal pulpa | 7.490276 | m ³ /h |
| Tratamiento Instantáneo | 9.28107394 | tph |
| Volumen Efectivo | 1.24837933 | m ³ |
| Volumen Total | 1.31408351 | m ³ |

| | | |
|-------------------------|-------|--------------------|
| Densidad sólido | 2.71 | ton/m ³ |
| Densidad líquido | 1 | ton/m ³ |
| % solidos | 15% | % |
| Densidad de la pulpa | 1.105 | ton/m ³ |
| Caudal pulpa | 0.27 | m ³ /h |
| Tratamiento Instantáneo | 0.30 | tph |
| Volumen Efectivo | 0.54 | m ³ |
| Volumen Total | 0.60 | m ³ |

| | | |
|-------------------------|-------|--------------------|
| Densidad sólido | 2.71 | ton/m ³ |
| Densidad líquido | 1 | ton/m ³ |
| % solidos | 31% | % |
| Densidad de la pulpa | 1.240 | ton/m ³ |
| Caudal pulpa | 7.24 | m ³ /h |
| Tratamiento Instantáneo | 8.98 | tph |
| Volumen Efectivo | 0.72 | m ³ |
| Volumen Total | 0.80 | m ³ |

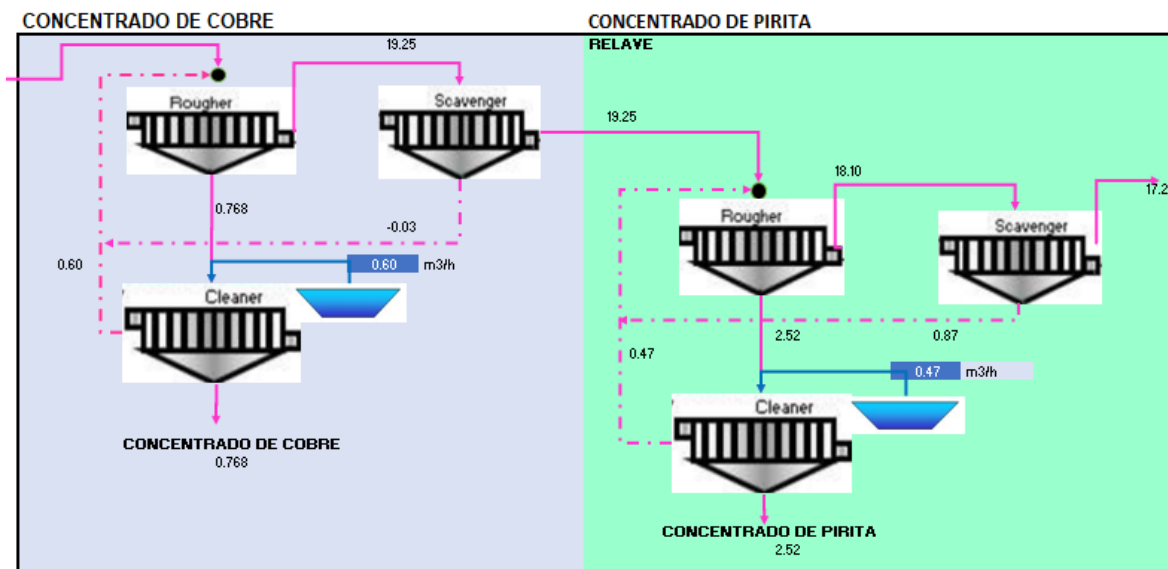
Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

Anexo V Dimensionamiento de sedimentadores

| Descripción | concentrado Cu | concentrado pirita | relave |
|-----------------------------|----------------|--------------------|--------|
| Pulpa, m ³ | 0.05 | 0.61 | 7.67 |
| sólidos entrada | 23% | 23% | 31% |
| sólidos de salida | 60% | 60% | 61% |
| Agua | 0.17 | 2.05 | 17.23 |
| Área sedimentador | 24.1 | 24.1 | 16.3 |
| Tiempo, h | 3 | 3 | 3 |
| v requerido, m ³ | 0.15 | 1.84 | 23.01 |
| h, m | 2 | 2 | 2 |
| r, m | 1.96 | 1.96 | 1.61 |
| Diámetro, m | 3.92 | 3.92 | 3.22 |

Fuente: Pardavé W., Santamaría Y. y Segura L. 2019

ANEXO W Balance de flotación Balance de sedimentación y filtrado



Fuente: Pardavé W., Santamaría Y y Segura L. 2019

