

**REALIZACIÓN DEL MODELO DEL PROCESO DE MNR DE LA UNIDAD DE
NEGOCIOS DE REFINERÍA EN CERRO MATOSO S.A. EMPLEANDO METSIM®**

ADRIANA SOFÍA ÁLVAREZ CORTÉS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2011

**REALIZACIÓN DEL MODELO DEL PROCESO DE MNR DE LA UNIDAD DE
NEGOCIOS DE REFINERÍA EN CERRO MATOSO S.A. EMPLEANDO METSIM®**

ADRIANA SOFÍA ÁLVAREZ CORTÉS

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniera Metalúrgica**

Director

**M.Sc. CUSTODIO VÁSQUEZ QUINTERO
Ingeniero Metalúrgico**

Codirector

**M.Sc. JULIO MARTÍN SÁENZ QUECHO
Superintendente de proyectos de producción CMSA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2011

DEDICATORIA

A **Díos**, mi voz interior. Quien me regala día a día la enorme fuerza de voluntad para realizar lo que deseo.

A **mis padres**, por brindarme su apoyo incondicional en todo momento.

A mis hermanas **Líneth, Paola y Paulína Álvarez Cortez** por ser una de las grandes razones para querer ser una mujer ejemplar.

A **Eivín Álvarez Cortes** por su confianza y por saber expresar las palabras correctas en el momento adecuado.

A mis verdaderos amigos. Gracias por hacerme sentir el calor de hogar. Por su respeto, honestidad, sencillez y humildad.

ADRIANA SOFÍA ÁLVAREZ CORTES

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Industrial de Santander** por permitirme entrar en su comunidad.

A **Rafael Guillermo Ardila Montero** por compartirme sus conocimientos, orientarme en todo momento y hacer parte esencial de este proyecto.

Al Ms.C **Custodio Vásquez Quintero** por toda su colaboración y apoyo.

Al Ms.C **Julio Sáenz Quecho** por brindarme la oportunidad de hacer y conocer parte del campo de la metalurgia extractiva.

A la **Escuela de Ingeniería Metalúrgica**, por ser parte esencial de mi formación profesional.

A mi **Dios** por estar presente en todo lo que hago.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	19
2.1 TEORÍA DEL PROCESO DE MNR	19
2.2 TEORÍA DE MOLIENDA, CLASIFICACIÓN Y SEPARACIÓN MAGNÉTICA	21
2.2.1 Molienda	21
2.2.1.1 Molino de bolas	23
2.2.1.2 Carga de material	24
2.2.1.3 % Sólidos en la alimentación	25
2.2.1.4 Alimentación con agua	25
2.2.1.5 Medio de molienda	25
2.2.1.6 Velocidad de rotación	26
2.2.1.5 Velocidad crítica	26
2.2.2.1 Hidrociclón	27
2.2.3 Separación Magnética	29
2.2.3.1 Separador Magnético	30
2.2.3.1 Separación de alta intensidad	30
2.2.3.1 Separación de baja intensidad	31
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	32
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	33
3.1.1 Consulta Bibliográfica	33

3.2 SELECCIÓN DE VARIABLES Y CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO	33
3.2.1 Recopilación de datos de proceso y diseño de planta	33
3.2.2 Selección de las operaciones unitarias a emplear, construcción del diagrama de flujo y caracterización de las corrientes	33
3.2.2.1 Elección de las operaciones unitarias de molienda	33
3.2.2.2 Elección de las operaciones unitarias de clasificación	34
3.2.2.3 Elección de las operaciones unitarias de separación magnética	34
3.2.3 Construcción del diagrama de flujo y caracterización de las corrientes	35
3.2.3.1 Construcción del diagrama de flujo en METSIM®	35
3.2.3.2 Caracterización de las corrientes	38
3.3 CONFIGURACIÓN DE OPERACIONES UNITARIAS Y CREACIÓN DE LA INTERFAZ EN EXCEL	39
3.3.1 Elección del modelo matemático a emplear en las operaciones unitarias correspondientes	39
3.3.1.1 Modelo cinético general de molienda	39
3.3.2. Configuración de cada operación unitaria	45
3.3.2.1 Configuración de la operación unitaria Ball Mill	45
3.3.2.2 Configuración de la operación unitaria Hydrocyclone	45
3.3.2.3 Configuración de la operación unitaria Magnetic Separator, Wet	46
3.3.3 Controladores empleados en el modelo	46
3.3.3.1 FRC Flow Rate Control (Control de Flujo)	46
3.3.3.2 PSC Percent Stream Control (Control de Porcentaje)	47
3.3.4 Creación de la interfaz METSIM® – Microsoft Excel	47
3.3.4.1 Molienda	48
3.3.3.2 Clasificación	49
3.3.3.3 Separación Magnética	51
3.3.5 Corrida de la simulación del modelo realizado para MNR	53
3.4 INFORME FINAL	53

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	54
4.1 Resultados preliminares Molienda	54
4.1.2 Empleando los coeficientes de función selección y función fractura	56
4.1.2.1 Ajuste del modelo	56
4.2 Resultados Clasificación	59
4.3 Resultados Separación Magnética	62
4.4 Interfaz en Excel	63
5. CONCLUSIONES	65
6. RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFIA	67
ANEXOS	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Análisis químico de la escoria que alimenta el proceso MNR	20
Tabla 2. Rango normal de valores para los coeficientes de molienda	58
Tabla 3. Valores empleados para ajustar el P80 en la descarga del molino	58
Tabla 4. Datos empleados para el cálculo de datos del hidrociclón	72
Tabla 5. Criterios de diseño del proceso de molienda	74
Tabla 6. Variables importadas a METSIM®	75
Tabla 7. Variables exportadas a Excel	77
Tabla 8. Funciones APL empleadas en el modelo	86

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de corrientes de entrada y salida del proceso de MNR	19
Figura 2. Molino de bolas de MNR	24
Figura 3. Representación gráfica de la carga interna de un molino de bolas	25
Figura 4. Esquema del trabajo de un hidrociclón	28
Figura 5. Esquema de un separador magnético de tambor	30
Figura 6. Separador Magnético para proceso en húmedo	31
Figura 7. Diagrama de metodología experimental	32
Figura 8. Diagrama de flujo general del modelo de MNR	36
Figura 9. Diagrama de flujo del modelo de MNR en METSIM [®]	37
Figura 10. Ecuación matricial del modelo cinético de conminución	44
Figura 11. Representación gráfica en Microsoft Excel de las curvas de distribución granulométrica para las corrientes de alimentación y descarga del molino de bolas después del ajuste del P80	57
Figura 12. Representación gráfica en Microsoft Excel de las curvas de distribución granulométrica para las corrientes de alimentación y descarga de los hidrociclones 1 ò 2	60
Las curvas mostradas en la figura 12 representan la distribución granulométrica de la escoria en la entrada del hidrociclón y en las salidas, Underflow (corriente de escoria gruesa que recircula al molino de bolas), Overflow (corriente de escoria fina clasificada) de los hidrociclones 1 ò 2	60

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Ecuaciones de Bond empleadas para el modelo de la operación unitaria de molienda	69
ANEXO B. Ecuaciones empleadas para el modelo de la operación unitaria de clasificación por hidrociclones	72
ANEXO C. Criterios de diseño del proceso de molienda	74
ANEXO D. Variables importadas a METSIM®	75
ANEXO E. Variables exportadas a Excel	77
ANEXO F. Funciones APL empleadas en el modelo	86
ANEXO G. Controladores activos y expresiones en el modelo de MNR	87

RESUMEN

TÍTULO: REALIZACIÓN DEL MODELO DEL PROCESO DE MNR DE LA UNIDAD DE NEGOCIOS DE REFINERÍA EN CERRO MATOSO S.A. EMPLEANDO METSIM^{®*}

AUTOR: ÁLVAREZ CORTÉS, Adriana Sofía**

PALABRAS CLAVES: METSIM[®], MNR, distribución granulométrica, balance de material, molienda, clasificación, separación magnética, operación unitaria.

DESCRIPCIÓN

El siguiente proyecto presenta la realización del modelo del proceso de MNR (Metallic Nickel Recovery) en Cerro Matoso S.A. empleando METSIM[®] (Metallurgical Simulator, by PROWARE). Al realizar el proyecto se buscó obtener un modelo adecuado para el proceso de recuperación de níquel metálico en la escoria de fusión, el cual reproduzca el balance de materiales, composición de corrientes, predicción de la distribución granulométrica y % de recuperación de concentrado de níquel metálico en cada una de las corrientes de salida de las operaciones unitarias de molienda, clasificación por hidrociclones y separación magnética. Al momento de implementar el modelo fue posible realizar el balance de material, la predicción de la distribución granulométrica de la escoria en las corrientes de entrada y salida de cada operación unitaria y posteriormente el análisis granulométrico especificando previamente datos relevantes como el flujo de alimentación de escoria, parámetros de operación y algunas variables de diseño de los equipos. De esta forma el modelo puede ser empleado para que ingeniería de proceso entienda y analice de una manera más confiable el comportamiento del circuito en general y le sea posible realizar mejoras para su optimización. Se obtuvieron representaciones gráficas del comportamiento del circuito ante cambios de operación, distribución de tamaño de partículas y % de sólidos, lo que permite deducir que variables como la distribución de tamaños de partículas y composición química en la escoria que alimenta al proceso y la fracción volumétrica de sólidos a la entrada del hidrociclón, son variables críticas del proceso, puesto que tienen un gran impacto sobre las características del producto final del circuito.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Custodio Vásquez Quintero. Codirector: Julio Martín Saenz Quecho.

SUMMARY

TITLE: REALIZATION OF MNR PROCESS MODEL OF THE BUSINESS UNIT REFINERY IN CERRO MATOSO S.A. USING METSIM[®]*

AUTHOR: ÁLVAREZ CORTÉS, Adriana Sofía **

KEY WORDS: METSIM[®], model, size distribution, material balance, grinding, classification, magnetic separation, unit operation.

DESCRIPTION

The next project presents the realization of the MNR (Metallic Nickel Recovery) process model in Cerro Matoso S.A. using METSIM[®] (Metallurgical Simulator, by PROWARE). To make the project seeks to obtain a adequate model for the recovery of metallic nickel in the slag melting process, which reproduce as result the material balance, stream composition, the size distribution predicting and % recovery of metallic nickel concentrate in each of the output stream of the unit operations of grinding, hydrocyclone classification and magnetic separation. When implementing the model was possible to make the material balance, the size distribution predicting of the slag in the output and input streams of each unit operation and then the particle size analysis previously specifying relevant data such as the feed of slag flow, operating parameters and design variables of the equipment. Thus the model can be used to process engineering understand and analyze in a more reliable the circuit behavior in general and possible to make improvements for optimization. Were obtained graphical representations of circuit behavior to changes in operation, distribution of particle size and % solids, which allows to conclude that variables such as particle size distribution and chemical composition in the slag that feeds the process and the volume fraction solids at the input stream of the hydrocyclone are critical process variables, since they have a big impact on final product characteristics of the circuit.

* Undergraduate Project

** Physical-Chemical Sciences Faculty, School of Metallurgical Engineering. Directress: Custodio Vásquez Quintero. Codirectress: Julio Martín Saenz Quecho.

INTRODUCCIÓN

Cerro Matoso S.A. es una empresa que empezó a producir ferroníquel en el año de 1982, hasta el día de hoy van 28 años en los cuales ha sufrido transformaciones muy marcadas en cuanto al proceso se refiere.

En la actualidad la empresa es líder a nivel mundial en la producción de ferroníquel con los más altos estándares de seguridad, producción, protección y preservación del medio ambiente.

El proceso de MNR (Metallic Nickel Recovery) tiene como objetivo principal extraer las partículas de níquel de la escoria de fusión a través de un circuito de molienda, clasificación por hidrociclones y separación magnética en húmedo. En éste es disminuido el tamaño de las partículas de escoria facilitando así la separación de las fracciones metálicas para que sean atrapadas magnéticamente y obtener como producto final un concentrado con un determinado contenido de níquel y un relave que se dispone en un botadero.

La liberación de especies minerales o “molienda”, es sin lugar a dudas el proceso unitario de mayor relevancia práctica en todo circuito de recuperación de minerales debido a que demanda la principal inversión de capital, incide fuertemente en los costos unitarios y determina en gran medida la rentabilidad de la operación, por lo que es posible indicar que herramientas como la simulación de procesos es una de las mejores formas de análisis de la cual se ha venido valiéndose la ingeniería para mejorar la eficiencia de estas operaciones.

Considerando el alto costo que tiene el proceso de molienda, una operación eficiente requiere evitar todo tipo de pérdidas como lo que es llamado la

“sobremolienda”, esto es que las partículas de escoria no deben ser reducidas a tamaños más allá de lo que es necesario.

Como una opción para mejorar el proceso en general, se desarrolla un modelo con el que sea posible optimizar y controlar el circuito; todo esto requiere profundizar en el estudio de las condiciones de operación y diseño de MNR.

La herramienta empleada para la simulación es METSIM[®], éste es un software aplicado a la metalurgia extractiva desarrollado para simular complejos balances de masa y energía con propósitos académicos o industriales. METSIM[®] se originó como un programa para simular procesos metalúrgicos, creado para realizar balances de masa alrededor de las principales operaciones unitarias del diagrama de flujo de un proceso complejo, su aplicación tuvo tanto éxito que fue expandido para incluir balances energéticos, químicos, controles de proceso, dimensionamiento de equipos, estimación de costos y análisis de procesos. El lenguaje en el cual se desarrolla es APL (*A Programming Language*).

Algunas de las ventajas de utilizar METSIM[®] son:

- ✓ Facilita la extrapolación y ampliación de opciones del proceso.
- ✓ La simulación de procesos es menos costosa que la operación de una planta piloto.
- ✓ Requiere al ingeniero para desarrollar una comprensión detallada del proceso y proporciona un formato para la evaluación de los criterios de diseño del proceso.
- ✓ Permite la evaluación de las técnicas de operación y la anticipación de posibles problemas.
- ✓ Comprende diversos módulos que contienen subconjuntos de ecuaciones que describen las especificaciones del diseño y las características de

funcionamiento para cada etapa del proceso. El sistema resuelve el subconjunto de ecuaciones para cada módulo, lo que permite un análisis individual de cada operación unitaria en el diagrama de flujo.

Teniendo en cuenta información de los parámetros de diseño y operación de las corrientes de entrada, cada módulo calcula todas las variables de la corriente de salida, que luego pueden ser utilizados como valores de entrada para el siguiente paso del proceso. Los datos adicionales de entrada necesarios para resolver las ecuaciones en cada módulo son solicitados por el programa y estos se almacenan como variables globales. Es posible suministrar datos de proceso obtenidos de plantas en funcionamiento, proyectos piloto a partir de procesos similares o estimaciones proporcionadas por el ingeniero.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar el modelo de MNR (Metallic Nickel Recovery) con base a los criterios de diseño del proceso de recuperación de níquel en la escoria de fusión de Cerro Matoso S.A. empleando METSIM[®] (Metallurgical Simulator), orientado a obtener resultados previos al simular las etapas de molienda, clasificación por hidrociclones y separación magnética de níquel metálico en la escoria.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar la simulación del balance de materiales, predicción de la distribución granulométrica y % de recuperación de níquel metálico en la escoria de los sistemas de molienda, clasificación por hidrociclones y separación magnética con base a los criterios de diseño del proceso empleando como herramienta de modelamiento el software METSIM[®].

Ajustar el modelo matemático correspondiente al molino de bolas con la finalidad de obtener resultados previos con base a los criterios de diseño de MNR.

Crear una interfaz empleando Microsoft Excel que permita el intercambio dinámico de datos de importación y exportación entre METSIM[®] y Excel.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 TEORÍA DEL PROCESO DE MNR

MNR es una sección funcional dentro del proceso de producción de ferroníquel de Cerro Matoso S.A, tiene como proveedores al proceso de fundición y a los botaderos de escoria y como cliente al proceso de fundición.

El proceso de fundición provee la escoria que desechan los hornos eléctricos, mientras que los botaderos proveen la escoria acumulada en ellos desde el inicio de la producción de ferroníquel, el proceso de fundición recibe de nuevo el concentrado de níquel extraído. La figura 1 muestra las corrientes de entrada y de salida del proceso de MNR.

Figura 1. Diagrama de corrientes de entrada y salida del proceso de MNR



Fuente: Manual de la subfase de recuperación de níquel de la escoria (MNR)

La escoria es un residuo generado en los hornos eléctricos, éste material después de ser granulado es evacuado en camiones y dispuesto en botaderos diseñados para tal fin. Los “botaderos” es la forma general para referirse al sitio de depósito de la escoria. La composición química con la que ingresa la escoria al proceso es mostrada en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis químico de la escoria que alimenta el proceso MNR

COMPONENTE	%
Níquel total	0.212
Níquel metálico	0.106
Hierro total	14.35
Hierro metálico	0.065
Alúmina	2.65
Sílica	57.16
Magnesia	19.91

Fuente: Manual de la subfase de recuperación de níquel de la escoria (MNR)

El proceso de recuperación de níquel en la escoria se realiza de manera automática en sus varias etapas, las secciones simuladas para el modelo comprende los sistemas de molienda, clasificación por hidrociclones y separación magnética.

En la etapa de alimentación el material es transportado a través de bandas y la dosificación está dada por alimentadores, la escoria es recibida desde dos líneas

de producción y desde el botadero y la lleva de forma constante y controlada hasta el sistema de molienda. En el sistema de molienda se forma una mezcla de agua con escoria que alimenta a un molino de bolas, donde las partículas de escoria son reducidas. La corriente de descarga del molino de bolas es dirigida a la etapa de clasificación por hidrociclones, del hidrociclón salen dos corrientes según el tamaño de partículas: la corriente de escoria fina (Overflow) y la corriente de escoria gruesa (Underflow). Para el sistema de clasificación se cuenta con cinco hidrociclones, tres de los cuales están en operación y dos en standby para servir de reemplazo. El sistema de separación magnética cuenta con 4 etapas: Una primera etapa es la separación de partículas metálicas de la corriente de partículas gruesas clasificadas en el hidrociclón. La segunda y tercera etapa consiste en separar las fracciones metálicas que están por debajo de 250 micras, la última etapa consiste en la limpieza del concentrado de níquel separado en la segunda y tercera etapa de clasificación. En la primera etapa se tienen dos corrientes de descarga: una corriente de concentrado recuperado y una corriente de partículas que no fueron atrapadas magnéticamente, ésta última recircula nuevamente al molino de bolas.

2.2 TEORÍA DE MOLIENDA, CLASIFICACIÓN Y SEPARACIÓN MAGNÉTICA

2.2.1 Molienda

La molienda es un proceso en el cual las partículas son reducidas de tamaño por una combinación de impacto y abrasión. El material disminuye su tamaño con el fin de separar un mineral de otro ya sea por vía seca o húmeda.

Por lo general, la molienda se realiza en molinos rotatorios, que giran alrededor de su eje horizontal y que contienen una carga de bolas a granel conocida como

“medios moledores”, los cuales están libres para moverse a medida que el molino gira produciendo la fractura de las partículas en su interior, por el impacto bola-partícula-bola [1]. El movimiento de la carcasa del molino tiende a arrastrar las bolas y estos a girar llevando entre sí partículas de material que quedan sujetas a fuerzas de fricción, cuando las bolas caen, después de haberse levantado del fondo de la carcasa a una determinada altura, desintegran el material por impacto.

La función de un circuito de molienda es reducir el tamaño de la partícula del mineral de tal manera que el material sea preparado para un proceso de separación posterior como la flotación o la concentración. La operación de molienda tiene que garantizar una distribución de tamaños de partícula permanentemente fijos, y ello se persigue si el sistema garantiza estar en estado estacionario, sin embargo, la operación de estos circuitos es principalmente perturbada por [2]:

- ✓ Las características del mineral que ingresa al circuito, tales como dureza, distribución de tamaños, tasa de alimentación y composición mineralógica.
- ✓ La tasa de alimentación de agua que ingresa al circuito.
- ✓ La naturaleza de la pulpa que ingresa al hidrociclón.
- ✓ La tasa de alimento de pulpa o suspensión debido a razones mecánicas, tales como atascamiento de válvulas, tuberías, descargas de hidrociclones.

En décadas pasadas la aplicabilidad del modelamiento y simulación en los procesos de molienda ha emergido significativamente, debido al alto consumo de energía de esta operación unitaria. Como es bien sabido, en los procesos de beneficio de minerales, la molienda gasta aproximadamente el 50% de la energía necesaria en el beneficio de minerales metálicos e industriales. Este consumo está determinado principalmente por las pérdidas de energía y el desgaste de los medios moledores [3].

De todas las etapas de beneficio de minerales la molienda es la más ineficiente, dando razón de la utilización de solo un 1% de la energía suministrada al molino como energía efectivamente utilizada en fracturar el mineral. Dentro de este escenario, las etapas de fragmentación son determinantes para establecer la eficiencia de las operaciones en planta [4].

2.2.1.1 Molino de bolas: Los molinos se pueden clasificar de acuerdo a su forma, método de descarga y si la molienda se realiza en seco o húmedo [5]. En MNR se utiliza un equipo electromecánico de forma circular accionado por un motor eléctrico y la molienda se realiza en húmedo, la figura 2 muestra el molino de bolas empleado en la planta.

Un molino esencialmente es un reactor que está transformando partículas grandes en partículas más pequeñas. Hay por supuesto, muchas formas de aplicar fuerzas a las partículas y causar fractura, pero el ingeniero metalúrgico está interesado principalmente en equipos de gran tamaño que procesen en forma continua grandes flujos de materiales frágiles con capacidad estable durante las veinticuatro horas del día. El reactivo en el molino es la alimentación que en él entra (que raramente es de un solo tamaño) y por lo general tiene una distribución granulométrica completa, de manera tal, que debe considerarse como un conjunto de reactivos. El producto es la distribución de tamaño del material que va saliendo del molino, no es un tamaño individual y debe utilizarse una curva o un conjunto de números para caracterizar su distribución granulométrica, de la misma manera que se indicó para el material de alimentación [6].

Figura 2. Molino de bolas de MNR



Fuente: Manual de la subfase de recuperación de níquel de la escoria (MNR).

La mejora en la liberación de partículas se busca por dos razones principales. En primer lugar, si la liberación se logra sin necesidad de moler las partículas de tamaños finos, menos se gasta en energía. En segundo lugar, el exceso de molienda no sólo es costoso sino que produce finos que tienden a interferir con los procesos de separación subsecuentes con lo que hace ambos procesos ineficientes y aún más costosos [7].

Entre los factores fundamentales que influyen en la operación de un molino de bolas están:

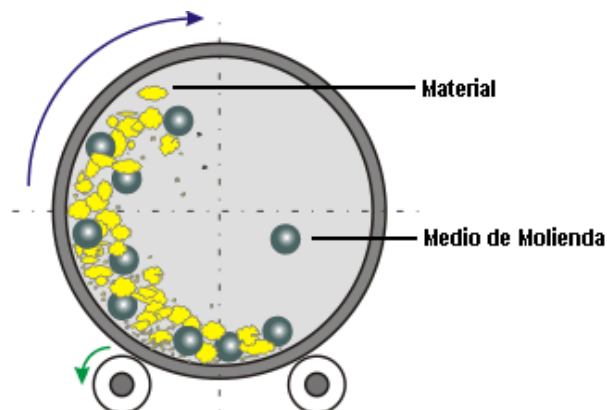
2.2.1.2 Carga de material: Es la cantidad de material que ingresa al equipo en un determinado tiempo. Cuanto más rápida sea la alimentación de material al molino más rápida será la descarga que llega al otro extremo y el producto final será por lo tanto más grueso, debido a que permanecerá menos tiempo sometido a molienda.

2.2.1.3 % Sólidos en la alimentación: Es la relación del peso de sólido seco contenido en la mezcla (sólido-liquido) frente al peso total de la misma expresado en porcentaje.

2.2.1.4 Alimentación con agua: Se refiere al flujo de agua que ingresa al molino de bolas en un determinado tiempo. Cuando el molino es operado por vía húmeda, el material molido es extraído con agua desde los espacios que quedan entre las bolas. El exceso de agua dentro del molino lavará las bolas y hará una mezcla fluida que disminuye el tiempo de molienda, obteniendo como resultado una molienda excesivamente gruesa.

2.2.1.5 Medio de molienda: La cantidad de bolas que se coloca dentro de un molino depende en gran parte de la energía disponible para moverlo. El aumento de los agentes moledores hace elevar el gasto de energía hasta alcanzar un valor máximo por encima del cual la energía necesaria disminuye al aumentar la carga de bolas. La figura 3 muestra la distribución de la carga (material y bolas) al interior del molino.

Figura 3. Representación gráfica de la carga interna de un molino de bolas



Cuanto más pequeñas sean las bolas, mayor será la finura del producto final. El tamaño del medio de molienda es importante debido a que al aumentar el tamaño de las bolas, la presión entre sus superficies es mayor posibilitando la ruptura de partículas grandes. Por otro lado, al disminuir el tamaño de las bolas, el área superficial disponible para la molienda de partículas pequeñas incrementa, resultando una mejora en la capacidad de molienda de éstas.

2.2.1.6 Velocidad de rotación: Es la velocidad a la cual gira el molino. En los molinos giratorios, la velocidad de rotación es uno de los parámetros de mayor importancia para su funcionamiento. A medida que ésta aumenta, la elevación del medio de molienda es mayor incrementándose por tanto la eficiencia de la molienda debido al mayor impacto sobre las partículas del fondo.

2.2.1.5 Velocidad crítica: La velocidad de rotación tiene un límite, ésta llega a un punto en el cual las bolas en lugar de caer se adhieren a la superficie de la carcasa por efecto de la fuerza centrífuga, en este caso se dice que el molino está centrifugado. Si la velocidad de rotación del molino es muy alta, comienza a actuar como una centrifugadora y las bolas no caen, sino que permanecen en el perímetro del molino y en ese punto se llama "Velocidad Crítica". Los molinos de bolas por lo general operan de 65% a 75% de la velocidad crítica [8].

2.2.2 Clasificación por hidrociclones

La clasificación es la operación en la que se produce la separación de un sistema particulado de una cierta distribución granulométrica en dos fracciones, una con una distribución en la que prevalecen los tamaños mayores y en otra los tamaños menores. Su objetivo principal es manipular las distribuciones de tamaños de los flujos en una planta con el fin de optimizar el comportamiento de otras operaciones.

Existe una gran variedad de propósitos que justifican una separación por tamaños en la industria minera, los principales son [9]:

- Prevenir la entrada de finos a las etapas de reducción de tamaño, así se aumenta la capacidad y eficiencia del proceso.
- Prevenir que los gruesos pasen a la siguiente etapa, en circuito cerrado en operaciones de reducción de tamaño.

El campo de la clasificación comprende aquellas operaciones que utilizan como principio de separación la velocidad de sedimentación, entendiéndose por ésta la velocidad relativa entre un fluido y un sólido que se produce por la acción de un campo de fuerza externo como el gravitatorio o uno centrífugo.

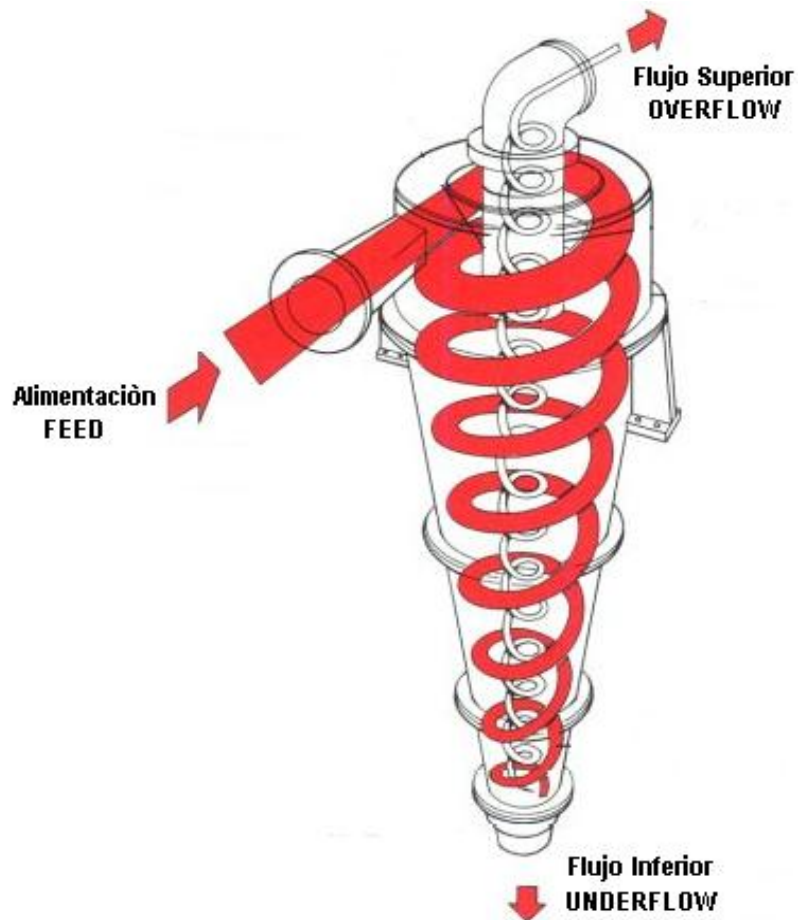
2.2.2.1 Hidrociclón: El rendimiento general de un hidrociclón es influenciado tanto por las variables de diseño (dimensiones) como por las variables de funcionamiento (presión, propiedades físicas de los sólidos de alimentación y pulpa de alimentación) [10]. El hidrociclón es el clasificador más ampliamente utilizado, sus principales ventajas son:

- ✓ Bajo costo inicial
- ✓ Requisitos de espacio
- ✓ Simplicidad de operación

En los hidrociclones, la corriente de alimentación entra tangencialmente a la parte cilíndrica bajo una cierta presión, lo que genera su rotación alrededor del eje longitudinal formando un torbellino primario descendente hacia el vértice de la parte cónica (como es representado en el flujo rojo de la figura 4). Las partículas más gruesas (debido a la aceleración centrífuga) giran cercanas a la pared, siendo

evacuadas a través de la boquilla en forma de corriente espesa (Underflow). Debido a las reducidas dimensiones del hidrociclón, solamente se evacua una parte de la suspensión, creándose en el vértice del cono un torbellino secundario de trayectoria ascendente (como es representado en el flujo blanco de la figura 4), el cual transporta las partículas finas junto con la mayor parte del líquido (Overflow) abandonando el hidrociclón. La separación dentro de un hidrociclón tiene lugar como resultado de estos dos procesos, y el punto de corte final será determinado principalmente por la aceleración centrífuga del torbellino secundario interior.

Figura 4. Esquema del trabajo de un hidrociclón



En un circuito cerrado de molienda, el rendimiento del hidrociclón determina en gran medida el agua y el balance de masa, que a su vez influyen en los parámetros de entrada al hidrociclón y éstos tienen un gran efecto en su rendimiento [11].

2.2.3 Separación Magnética

Es un proceso utilizado para concentrar minerales que poseen diferencias en su susceptibilidad magnética, es decir, que responden en forma diferente ante la aplicación de un campo magnético. De acuerdo con su susceptibilidad magnética los minerales pueden ser clasificados como:

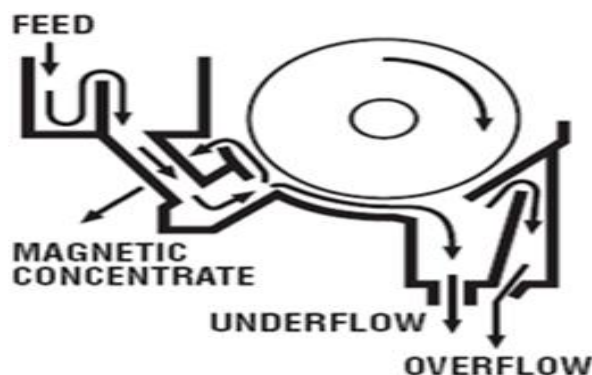
Paramagnéticos: Materiales que experimentan magnetización ante la aplicación de un campo magnético.

Ferromagnéticos: Materiales que experimentan alto paramagnetismo ante la aplicación de un campo magnético, como el hierro y níquel.

Diamagnéticos: Materiales que repelen el campo magnético.

El proceso separa dos sólidos teniendo en cuenta que la característica de uno de ellos debe ser ferrosa o tener propiedades magnéticas. La figura 5 representa la forma en la que trabaja un separador magnético de tambor, el método consiste en acercar un imán a la mezcla, a fin de generar un campo que atraiga el material con propiedades magnéticas dejando solamente el material no magnético.

Figura 5. Esquema de un separador magnético de tambor



Fuente: Manual de la subfase de recuperación de níquel de la escoria (MNR).

En MNR ésta es la etapa en la cual las partículas de níquel son removidas de la escoria, y donde se obtiene el concentrado de níquel que se reingresa al proceso de producción de ferroníquel.

2.2.3.1 Separador Magnético: Dada la influencia de la susceptibilidad magnética en la magnitud de las fuerzas que interactúan sobre cada una de las partículas a separar, se han desarrollado dos procesos de separación magnética:

- Separación de alta intensidad
- Separación de baja intensidad

Los cuales a su vez pueden ser llevados bajo diferentes condiciones: seco o húmedo, a alta o baja intensidad con el fin de promover la acción de algunos tipos de fuerzas sobre cada una de las partículas.

2.2.3.1 Separación de alta intensidad: Este proceso generalmente se utiliza para separar especies paramagnéticas de especies diamagnéticas. Dado que la fuerza magnética que experimentan estas partículas es débil, este proceso suele realizarse en seco y en equipos no rotativos.

2.2.3.1 Separación de baja intensidad: Este tipo de proceso se utiliza para separar especies ferromagnéticas de las especies diamagnéticas. Dado que la fuerza de magnetización que se produce sobre esta especie es alta, se requiere que sobre las partículas actúen fuerzas como las hidrodinámicas y la fuerza centrífuga (adicional a la fuerza de gravedad) con el fin de obtener un proceso suficientemente selectivo. Por tal razón, este proceso se realiza en medio húmedo y en equipos de tambor rotatorio. Los separadores magnéticos de baja intensidad han sido diseñados en torno a un tambor giratorio con un conjunto magnético interno fijo.

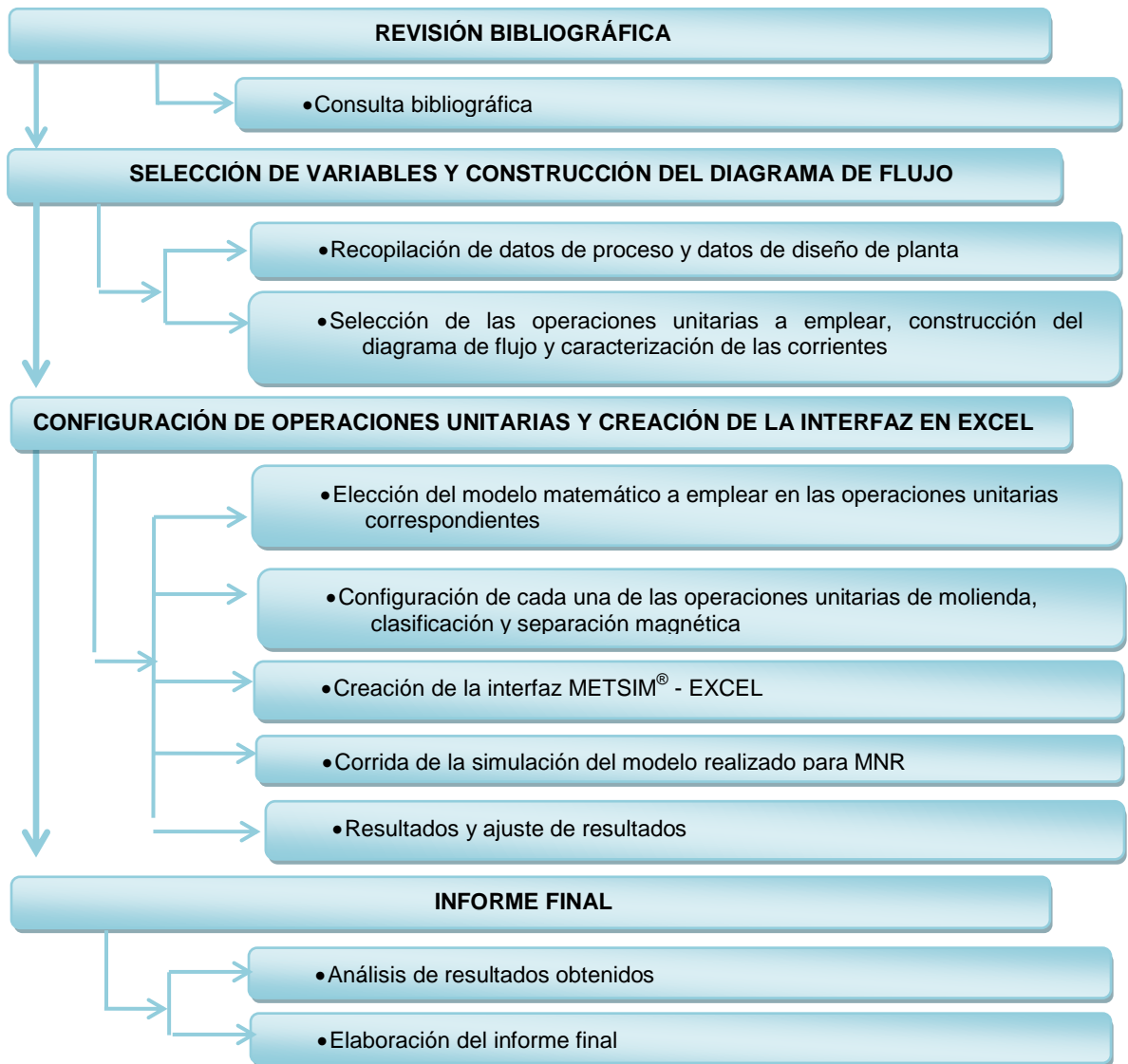
Los separadores magnéticos empleados en MNR, son tambores de separación magnética en húmedo de baja intensidad como es mostrado en la figura 6.

Figura 6. Separador Magnético para proceso en húmedo



3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Figura 7. Diagrama de metodología experimental



3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1.1. Consulta Bibliográfica

En primera instancia se realizó la consulta de información que en su mayoría se encuentra en la base de datos de Cerro Matoso S.A.

3.2 SELECCIÓN DE VARIABLES Y CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO

3.2.1 Recopilación de datos de proceso y diseño de planta

Se recopilaron datos necesarios y requeridos para el desarrollo del modelo, estos fueron obtenidos directamente de la empresa.

3.2.2 Selección de las operaciones unitarias a emplear, construcción del diagrama de flujo y caracterización de las corrientes

En esta fase se seleccionaron las operaciones unitarias de molienda, clasificación por hidrociclones y separación magnética en húmedo disponibles en METSIM® y en conjunto formaron el diagrama de flujo del modelo. Posterior a esto se caracterizaron las corrientes correspondientes.

3.2.2.1 Elección de las operaciones unitarias de molienda: Para la construcción del modelo, se emplearon las siguientes operaciones unitarias:



Ball Mill, se despliega del módulo de operaciones unitarias COM (Comminution) o conminución y es utilizada para simular un molino de bolas.



Stream Mixer, se despliega del módulo de operaciones unitarias GEN (General) o generales y es utilizado para mezclar la corriente de escoria que alimenta al molino de bolas con agua de proceso.

Con el objetivo de ajustar el porcentaje de sólidos en las corrientes de alimentación al molino de bolas e hidrociclones, fue necesario el empleo de controladores dispuestos en METSIM®.



Percent Stream Control, se despliega del módulo de operaciones unitarias CTL (Controls) o controles.

3.2.2.2 Elección de las operaciones unitarias de clasificación: Para la construcción del modelo se emplearon las siguientes operaciones unitarias:



Hydrocyclone, se despliega del módulo de operaciones unitarias COM (Comminution) o conminución y es utilizado para simular la batería de hidrociclones.



Stream Distributor, se despliega del módulo de operaciones unitarias GEN (General) o generales y es empleado como un mezclador de la corriente de descarga de escoria del molino de bolas con agua de proceso.

3.2.2.3 Elección de las operaciones unitarias de separación magnética: Para la construcción del modelo de separación magnética se emplearon las siguientes operaciones unitarias:



Magnetic Separator, Wet, se despliega del módulo de operaciones unitarias BEN (Beneficiation) o beneficio y es empleado para simular la serie de tambores separadores magnéticos.

Con el objetivo de complementar el diagrama de flujo del modelo de MNR, se emplearon las siguientes operaciones unitarias adicionales:



Conveyor, Chain/Drag, se despliega del módulo de operaciones unitarias MTL (Material Handling) o manipulación de material, representa las bandas transportadoras que alimentan la escoria al proceso.



Pump Centrifugal, se despliega del módulo de operaciones unitarias GEN (General) o generales, representa las bombas que impulsan la corriente de descarga del molino de bolas hacia los hidrociclones.

3.2.3 Construcción del diagrama de flujo y caracterización de las corrientes

3.2.3.1 Construcción del diagrama de flujo en METSIM[®]: En esta etapa se unen las operaciones unitarias de molienda, clasificación por hidrociclones y separación magnética para formar un circuito en conjunto del proceso como es representado en la figura 8.

Figura 8. Diagrama de flujo general del modelo de MNR

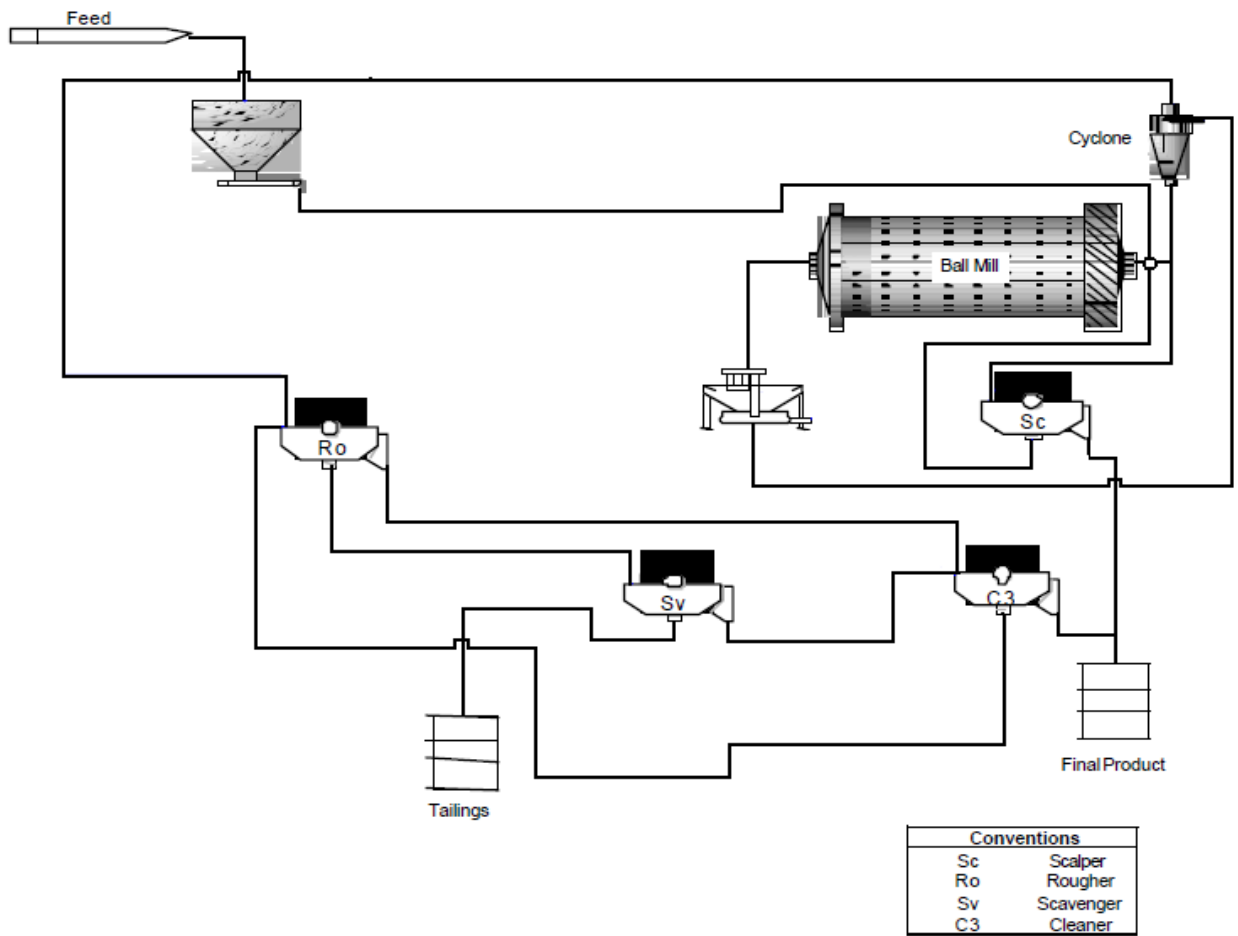
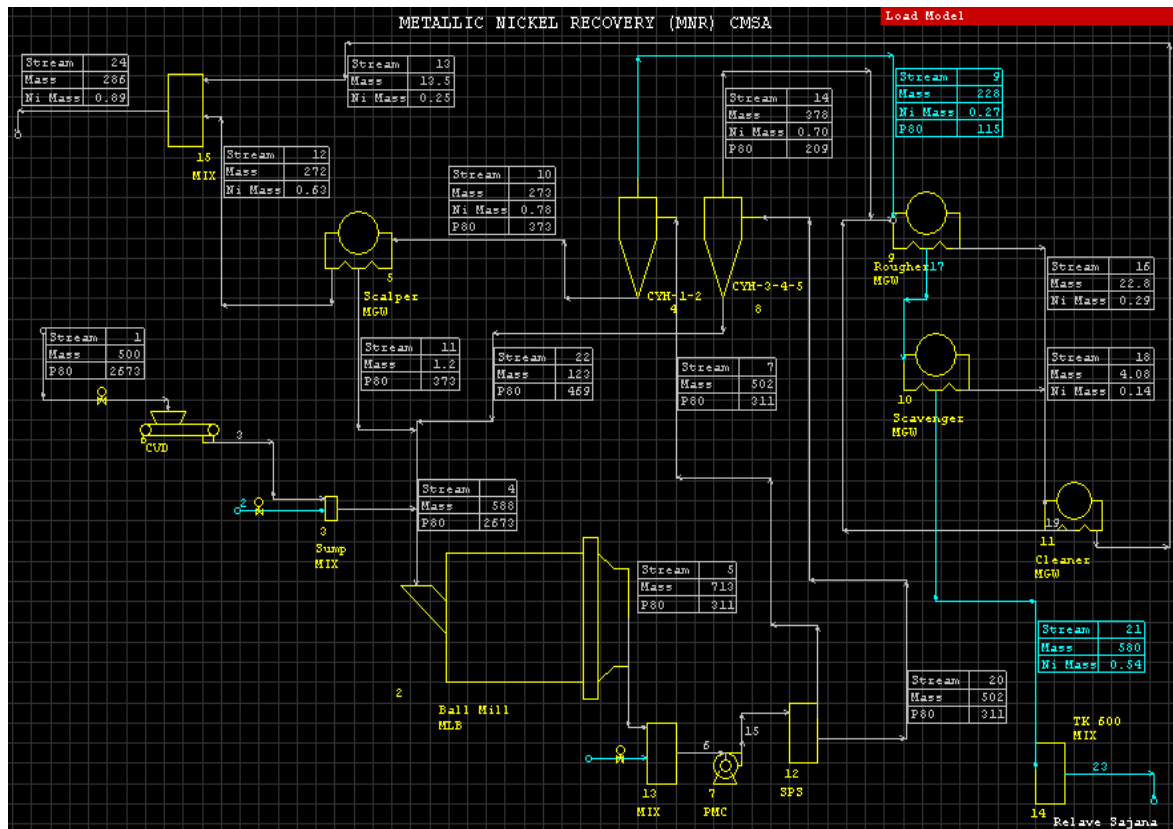


Figura 9. Diagrama de flujo del modelo de MNR en METSIM®



En la figura 9 se muestra la unión por medio de corrientes de las diferentes operaciones unitarias seleccionadas para así conformar el diagrama de flujo. En este se puede observar cada una de las etapas del proceso indicando:

- Número de corriente que ingresa y sale de cada operación unitaria
- Flujo másico (toneladas por hora)
- P80
- Níquel en la corriente de concentrado (toneladas por hora).

El proceso inicia con la recepción de escoria, ésta es un subproducto desechado del proceso de fundición en la producción de ferroníquel en Cerro Matoso S.A., la escoria es alimentada al proceso de molienda a través de bandas transportadoras

hasta llegar a un molino de bolas al que se le inyecta una corriente de agua adicional para ajustar el porcentaje de sólidos, esta pulpa sufre el proceso de molienda y es descargada directamente en un tanque en el que se entra una corriente de agua adicional para ajustar el porcentaje de sólidos en la batería de hidrociclones. Al llegar la corriente a los hidrociclones, ésta es clasificada y de aquí es dividida en dos corrientes de descarga: una corriente de escoria gruesa y otra corriente de escoria fina. Posterior a esto, cada corriente de descarga de la batería de hidrociclones es pasada por una serie de separadores magnéticos de los cuales descargan dos corrientes: una corriente de concentrado que lleva las partículas atrapadas magnéticamente y otra corriente de partículas que no pudieron ser separadas o que no tienen propiedades magnéticas para ser atrapadas.

3.2.3.2 Caracterización de las corrientes: En esta etapa se editan las corrientes de entrada y salida de cada operación unitaria, editar una corriente es ingresar información como:

- ✓ Descripción o nombre de la corriente.
- ✓ Cantidad en unidades de masa por tiempo de fase sólida y líquida.
- ✓ % de sólidos en la corriente.
- ✓ Fracción en peso de los elementos en fase sólida y líquida.
- ✓ Distribución granulométrica de las partículas.

3.3 CONFIGURACIÓN DE OPERACIONES UNITARIAS Y CREACIÓN DE LA INTERFAZ EN EXCEL

3.3.1 Elección del modelo matemático a emplear en las operaciones unitarias correspondientes

En esta etapa se detalla el modelo empleado para la operación unitaria de molienda.

3.3.1.1 Modelo cinético general de molienda: Un proceso típico de conminución puede ser representado matemáticamente mediante una ecuación general de balance macroscópico, que incorpora tres conceptos importantes [12]:

- ✓ Velocidad específica con que las partículas de cada tamaño son fracturadas por unidad de tiempo.
- ✓ Distribución de tamaño resultante de cada partícula fracturada.
- ✓ Un posible evento de clasificación interna de las partículas dentro del respectivo equipo de conminución, el cual puede o no estar presente en cada situación en particular.

Los conceptos anteriores son representados matemáticamente a través de las siguientes tres funciones:

- ❖ Función Selección (Matriz \underline{S})
- ❖ Función distribución de fractura, expresada como el porcentaje acumulado pasante (Matriz \underline{B})
- ❖ Función clasificación interna (Matriz \underline{C})

La función selección determina la cantidad de partículas que se rompen en un período de tiempo. Esta función se utiliza para la eficiencia de los molinos. Por otra parte, la función fractura es la velocidad a la cual las partículas son seleccionadas por la función selección a ser partículas de otro tamaño [13].

La distribución de tamaño de partículas dentro de un mismo intervalo permanece constante, de modo que el i -ésimo intervalo de tamaño d_{i-1}/d_i ($i = \overline{1, n+1}$) es suficientemente pequeño como para garantizar que en promedio, los parámetros cinéticos de conminución no dependan significativamente de la distribución granulométrica existente dentro de dicho intervalo. Por tal razón, el sistema particulado caracterizado por un tamaño máximo d_0 y un tamaño mínimo $d_{n+1} (= 0)$, es subdividido en $(n+1)$ intervalos de tamaño.

El proceso de reducción de tamaño puede ser representado a través de este modelo, mediante un conjunto de valores de la función selección ($S_i(t); i = \overline{1, n+1}$) y función distribución de fractura de los tamaños discretizados ($b_{ij}(t); i = \overline{1, n+1}; j = \overline{1, i}$); además de los correspondientes elementos de la función clasificación interna ($C_i(t); i = \overline{1, n+1}$). Para el proceso de molienda en molino de bolas esta función de clasificación interna es nula [14].

De este modo, para el i -ésimo intervalo de tamaño, la función selección $S_i(t)$ denota la fracción en peso de material con rango de tamaños d_{i-1}/d_i , que es fracturada por unidad de tiempo durante el intervalo de tiempo t a $t+dt$. Se supone además que $S_{n+1}(t)=0$ para el $(n+1)$ -ésimo intervalo de tamaño (siendo $d_{n+1}=0$, por definición y d_n =abertura de la malla más fina utilizada en el análisis granulométrico de la muestra).

La función distribución parcial de fractura $b_{ij}(t)$ representa la fracción en peso de material contenido en el rango de tamaños d_{i-1}/d_i , que es producido por fractura primaria del material contenido en otro rango de tamaño mayor d_{j-1}/d_j durante el intervalo de tiempo $(t, t+dt)$, se supone que $b_{n+1, j}=0$ (es decir, el cálculo se efectúa solo hasta la n-ésima malla, y la fracción más fina que d_n se calcula por diferencia).

La ecuación que define el “proceso global de conminución” puede ser desarrollada como sigue:

$$f_{PC} = P \cdot f_{AC}$$

$$f_{CC} = c \cdot f_{PC} = P \cdot f_{AC}$$

$$f_p = (1 - c) \cdot f_{PC} = (1 - c) \cdot P \cdot f_{AC}$$

$$f_{AC} = f_A + f_{CC} = f_A + c \cdot P \cdot f_{AC}$$

El significado de los diferentes términos es como sigue:

\underline{P} = Matriz de proceso (que depende de las funciones \underline{B} y \underline{S}) utilizada para cuantificar el proceso efectivo de conminución dentro del equipo, es una matriz triangular inferior (de orden $n \times n$), cuyos elementos son distintos que cero, exceptuando aquellos valores ubicados arriba de la diagonal principal (se supone que no existe efecto de aglomeración del material y que el efecto de atrición es despreciable, de modo que $b_{ij}=0$ para $i \leq j$).

\underline{c} = Matriz de clasificación interna (de orden $n \times n$), es una matriz diagonal cuyos elementos representan la fracción en peso de cada rango de tamaño del producto

de conminución, que es recirculado dentro de la misma etapa. Por lo general la matriz \underline{c} contiene el valor 1 en la posición (1,1) y valores decrecientes ≤ 1 en las posiciones (i, j) para $i = \overline{2, n}$, siendo los restantes elementos c_{ij} ($i \neq j$) iguales a cero (por definición).

fA = Vector alimentación del equipo de conminución (nx1), es un vector columna cuyos elementos representan la distribución granulométrica parcial (% en peso retenido) de la alimentación al equipo.

fP = Vector producto del equipo de conminución, se trata de un vector columna cuyos elementos representan la distribución granulométrica parcial del producto que abandona el equipo.

fAC = Vector alimentación de la etapa efectiva de conminución.

fPC = Vector producto de la etapa efectiva de conminución.

fCC = Vector carga circulante (nx1), se trata de un vector columna que representa la distribución granulométrica parcial del material grueso recirculado a la etapa de conminución.

Se despeja fAC de la última ecuación, se obtiene:

$$(I - c.P).fAC = fA$$

De donde: $fAC = (I - c.P)^{-1}.fA$

Finalmente se obtiene la relación buscada:

$$f_p = (I - c) \cdot P \cdot (I - c \cdot P)^{-1} \cdot f_A$$

Donde I = Matriz de identidad (de orden $n \times n$), esta ecuación constituye un modelo matemático matricial de tipo general, para un proceso típico de conminución.

Teniendo en cuenta que en un molino de bolas el efecto de clasificación interna es despreciable, la ecuación anterior adopta la siguiente forma:

$$f_p = P \cdot f_A$$

Donde $c = 0$ Matriz nula (de orden $n \times n$), esta ecuación constituye un caso particular, suponiendo que el efecto de clasificación interna es despreciable. El problema entonces será evaluar la matriz P a objeto de utilizar la ecuación general con fines predictivos.

La siguiente ecuación es conocida como la “Ecuación general del modelo cinético de conminución”, es válida para cualquiera de los “ n ” intervalos de tamaños considerados anteriormente ($i = \overline{1, n}$), pudiendo representarse mediante una simple ecuación matricial el conjunto de las “ n ” ecuaciones diferenciales resultantes:

$$\frac{df(t)}{dt} = -[1 - b(t)] \cdot S(t) \cdot f(t)$$

O bien, más detalladamente:

Figura 10. Ecuación matricial del modelo cinético de conminución

$$\begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ f_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_1(t) & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ b_{21}(t)S_1(t) & -S_2(t) & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ b_{31}(t)S_1(t) & b_{32}(t)S_2(t) & -S_3(t) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ b_{n1}(t)S_1(t) & b_{n2}(t)S_2(t) & b_{n3}(t)S_3(t) & b_{n,n-1}(t)S_{n-1}(t) & -S_n(t) & \cdot & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n(t) \end{bmatrix}$$

En la figura 10 se muestran ecuaciones en las que la función selección y fractura se presentan como variables dependientes del tiempo, este simple formalismo matemático es utilizado para indicar la eventual naturaleza no-lineal de los procesos de conminución, es decir, suponiendo que tales parámetros están influenciados por la distribución granulométrica de la carga interna del equipo, la que a su vez se supone variable en el tiempo. No obstante, en muchas situaciones de interés práctico se ha observado que la función distribución de fractura es aproximadamente constante para un amplio rango de condiciones experimentales, y que la función selección puede también considerarse invariante en el tiempo para variadas aplicaciones industriales.

Una expresión desarrollada para resolver el sistema de “n” ecuaciones diferenciales lineales, es la siguiente:

$$f(t) = [T \cdot J \cdot T^{-1}] \cdot f(0)$$

Donde T es una matriz triangular inferior (de orden nxn), cuyos elementos T_{ij} están dados por:

$$T_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{para } i < j \\ 1 & \text{para } i = j \\ \sum_{k=j}^{i-1} \frac{b_{ik} \cdot S_k}{S_i \cdot S_j} T_{kj} & \text{para } i > j \end{cases}$$

Mientras que J es una matriz diagonal (de orden nxn), cuyos elementos $J_{ij}(t)$ están dados por:

$$J_{ij}(t) = \begin{cases} \exp(S_i \cdot t) & \text{para } i = j \\ 0 & \text{para } i \neq j \end{cases}$$

Siendo la matriz de proceso:

$$P = T \cdot J \cdot T^{-1}$$

$P(0) = I$ (por definición), para el instante inicial $t = 0$.

La ecuación del perfil granulométrico está completamente determinado por dos tipos de parámetros físicamente identificables y experimentalmente medibles: S_i y b_{ij} .

3.3.2. Configuración de cada operación unitaria

3.3.2.1 Configuración de la operación unitaria Ball Mill: En la pantalla principal de METSIM[®] se selecciona la operación unitaria MLB (Ball Mill) que simula uno o múltiples molinos de bolas en paralelo.

3.3.2.2 Configuración de la operación unitaria Hydrocyclone: En METSIM[®] se puede seleccionar una de dos formas para configurar dependiendo de la información con la que se dispone. La primera es empleada si se conocen

distintos datos de dimensionamiento del hidrociclón, por lo que el equipo se puede dimensionar entrando los datos requeridos por la operación unitaria y la distribución granulométrica de partículas es calculada por el simulador. La segunda se emplea si se conoce la distribución granulométrica de las partículas en la corriente de alimentación, por lo cual los parámetros relevantes son calculados por defecto por el simulador.

Se selecciona la operación unitaria CYH (Hydrocyclone) que simula uno o múltiples hidrociclones en paralelo.

3.3.2.3 Configuración de la operación unitaria Magnetic Separator, Wet: Es seleccionada la operación unitaria MGW (Magnetic Separator, Wet), simula uno o múltiples separadores magnéticos en paralelo.

3.3.3 Controladores empleados en el modelo

Los controladores funcionan de manera similar a los de las plantas en funcionamiento. El modelo es desarrollado usando limitaciones estándar, y luego el módulo de control de procesos es usado para liberar limitaciones que son aplicadas e imponer las que son deseadas por el usuario.

Dentro de los módulos de operaciones unitarias se encuentra el módulo de control de procesos CTL (Control), éste se emplea para realizar ciertas restricciones al modelo.

3.3.3.1 FRC Flow Rate Control (Control de Flujo): Es un controlador que establece el flujo de una corriente antes de usar esta. En el modelo, la corriente a ser ajustada es la que alimenta al proceso de molienda y la composición de la corriente no cambia al aplicar el controlador.

3.3.3.2 PSC Percent Stream Control (Control de Porcentaje): PSC es un controlador empleado para ajustar la concentración de un componente o fracción de sólidos en la corriente de alimentación a una operación unitaria.

Las características de este controlador son:

- Controlar el flujo de la corriente de entrada a fin de mantener una fracción de sólidos en esta corriente de alimentación.
- Se puede colocar en cualquier operación unitaria.
- La acción del control es realizada antes de cualquier cambio, por lo tanto, los valores de los flujos de salida pueden ser diferentes de los valores establecidos para los flujos de entrada.

3.3.4 Creación de la interfaz METSIM® – Microsoft Excel

Con el objetivo de hacer aún más sencillo el ingreso y la variación de datos en METSIM® para un posterior análisis de las variables que influyen en el proceso, se creó una interfaz en Microsoft Excel que permite la importación y la exportación de datos generados en METSIM® a Microsoft Excel.

Esta interfaz es de gran aplicación:

- ✓ Permite realizar de forma más ágil el ajuste del P80 de la curva de distribución granulométrica en la corriente de descarga del molino de bolas mediante la variación manual de los coeficientes de función selección y fractura.
- ✓ Es útil para analizar los resultados obtenidos con respecto a la sensibilidad de cada uno de los parámetros de las distintas operaciones

unitarias y de los coeficientes de las funciones selección y fractura en la curva de distribución granulométrica.

- ✓ Se puede visualizar datos como: parámetros necesarios a ingresar de los equipos de molienda, clasificación y separación magnética, el flujo en masa de cada una de las corrientes, las curvas de distribución granulométrica provenientes de las corrientes que actúan y recuperación de níquel en la corriente de concentrado.

3.3.4.1 Molienda

BALL MILL							
Parameters		Input			Output		
Input		Mesh Tyler	% Pass.	Size (µ)	Mesh Tyler	0	Size (µ)
Length Inside (m)	14.7	% Mesh 4	85.4	4750	% Mesh 4	100.0	4750
Work Index kWh/st	25.0	% Mesh 8	76.9	2360	% Mesh 8	100.0	2360
Power Draw Factor	1.0	% Mesh 12	59.9	1700	% Mesh 12	100.0	1700
Open Circuit Design Factor	1.1	% Mesh 16	33.6	1180	% Mesh 16	99.9	1180
Breakage Function Coefficient	2.0	% Mesh 20	16.7	850	% Mesh 20	99.4	850
AA[1]	2.0	% Mesh 30	7.9	600	% Mesh 30	98.2	600
AA[2]	1.1	% Mesh 60	2.7	250	% Mesh 60	73.8	250
AA[3]	4000.0	% Mesh 100	0.9	150	% Mesh 100	46.6	150
AA[4]	4.0	% Mesh 140	0.6	106	% Mesh 140	30.5	106
Volume Ball Loading (fraction)	0.5	% Mesh 200	0.4	75	% Mesh 200	18.6	75
% Solids Feed Ball Mill (fraction)	0.85	% Mesh 270	0.3	53	% Mesh 270	11.1	53
		% Fondo	0.0	31	% Fondo	0.0	31
Components				Size (µ)			Size (µ)
Ni Metallic	0.13	P80(Calculated) Input		2673	P80(Calculated) Output		311
NiO	0.32			Ton/Hr			Ton/Hr
Fe2O3	20.43	Input Escoria		500	Output Escoria		713
MgO	19.68	Cálculo de Recirculación en circuito de Molienda					
SiO2	54.39						
Al2O3	2.81	Densidad de Sólidos (Ton/m3)					2.90
CaO	0.46	% de Sólidos a los hidrociclones					60.00
Co3O4	0.02	Toneladas secas al molino (Ton/hora)					500.00
Cr2O3	1.26	Flujo hacia hidrociclones (m3/hora)					1235.00
MnO	0.49	Masa de sólidos a hidrociclones (Ton/hora)					1934.20
P2O5	0.01	Agua hacia hidrociclones (m3/hora)					1901.97
		% Recirculación de material al molino					286.84

Los datos seleccionados en verde son de exportación, resultados obtenidos al correr el modelo enviados desde METSIM® a Microsoft Excel, entre estos se tienen:

- % Acumulado Pasante en la corriente de descarga del molino
- P80 en la corriente de alimentación y descarga del molino de bolas
- Toneladas/hora de escoria en la descarga del molino de bolas

Los datos seleccionados en naranja son de importación, datos necesarios para ingresar a las diferentes operaciones unitarias enviados desde Microsoft Excel a METSIM[®], entre estos se tiene:

- % Acumulado Pasante en la corriente de alimentación al molino
- Toneladas/hora de escoria en la alimentación al molino de bolas
- Longitud del molino (metros)
- Work Index del material que ingresa al proceso
- Factor de diseño
- Factor de consumo de energía
- Coeficientes de la función selección y función fractura.
- Carga de bolas al molino (Fracción)
- % de sólidos en la alimentación del molino
- % de componentes en la escoria

3.3.3.2 Clasificación

HYDROCYCLONE 162							
Parameters		OVERFLOW			UNDERFLOW		
		Mesh Tyler	% Pass.	Size (μ)	Mesh Tyler	% Pass.	Size (μ)
Diameter Hydrocyclone (mm)	559	% Mesh 4	100.0	4750	% Mesh 4	100.0	4750
Number of Hydrocyclones	1	% Mesh 8	100.0	2360	% Mesh 8	100.0	2360
Desired Underflow Density (fraction)	0.82	% Mesh 12	100.0	1700	% Mesh 12	100.0	1700
		% Mesh 16	100.0	1180	% Mesh 16	99.9	1180
		% Mesh 20	100.0	850	% Mesh 20	99.3	850
		% Mesh 30	100.0	600	% Mesh 30	97.6	600
		% Mesh 60	100.0	250	% Mesh 60	64.9	250
		% Mesh 100	94.5	150	% Mesh 100	30.2	150
		% Mesh 140	74.7	106	% Mesh 140	15.4	106
		% Mesh 200	49.4	75	% Mesh 200	8.0	75
		% Mesh 270	30.1	53	% Mesh 270	4.5	53
		% Fondo	0.0	45	% Fondo	0.0	45
		P80(Calculated)		Size (μ)	P80(Calculated)		Size (μ)
				115			373
		Flow		Ton/Hr	Flow		Ton/Hr
				228			273

HYDROCYCLONE 3-4-5							
Parameters		OVERFLOW			UNDERFLOW		
		Mesh Tyler	% Pass.	Size (µ)	Mesh Tyler	% Pass.	Size (µ)
Diameter Hydrocyclone (mm)	559	% Mesh 4	100.0	4750	% Mesh 4	100.0	4750
Number of Hydrocyclones	2	% Mesh 8	100.0	2360	% Mesh 8	100.0	2360
Desired Underflow Density (Fraction)	0.82	% Mesh 12	100.0	1700	% Mesh 12	100.0	1700
% Solids Feed Hydrocyclone	0.6	% Mesh 16	100.0	1180	% Mesh 16	99.7	1180
		% Mesh 20	100.0	850	% Mesh 20	98.4	850
		% Mesh 30	100.0	600	% Mesh 30	94.7	600
		% Mesh 60	90.5	250	% Mesh 60	41.0	250
		% Mesh 100	59.9	150	% Mesh 100	20.3	150
		% Mesh 140	39.8	106	% Mesh 140	12.1	106
		% Mesh 200	24.5	75	% Mesh 200	7.0	75
		% Mesh 270	14.6	53	% Mesh 270	4.1	53
		% Fondo	0.0	45	% Fondo	0.0	45
		P80(Calculated)		Size (µ)	P80(Calculated)		Size (µ)
				209			469
		Flow		Ton/Hr	Flow		Ton/Hr
				378			123

Los datos seleccionados en verde son de tipo exportación, entre estos se tiene:

- % Acumulado Pasante en la corriente de Overflow (finos) a la salida del hidrociclón.
- % Acumulado Pasante en la corriente de Underflow (gruesos) a la salida del hidrociclón.
- P80 en la corriente de Overflow y Underflow a la salida del hidrociclón.
- Toneladas/hora de escoria en la corriente de Overflow y Underflow a la salida del hidrociclón.

Los datos seleccionados en naranja son de tipo importación, entre estos se tiene:

- Diámetro del hidrociclón.
- Número de hidrociclones.
- Densidad deseada en el Underflow.
- % de sólidos en la alimentación del hidrociclón.

3.3.3.3 Separación Magnética

MAGNETIC SEPARATOR - SCALPER

Parameters	
Concentrate, Weight Fraction (<1)	0.80
Number of Separators Magnetic	3.00
Nickel Metallic Recovery, Weight Fraction (<1)	0.75
Nickel Total Recovery, Weight Fraction (<1)	0.81

	Ni Metallic Ton/Hr	Ni Total Ton/Hr
Feed Scalper	0.33	0.78
Concentrate Scalper	0.25	0.63
Tails Scalper	0.08	0.15

MAGNETIC SEPARATOR - ROUGHER

Parameters	
Concentrate, Weight Fraction (<1)	0.80
Number of Separators Magnetic	4.00
Nickel Metallic Recovery, Weight Fraction (<1)	0.50
Nickel Total Recovery, Weight Fraction (<1)	0.30

	Ni Metallic Ton/Hr	Ni Total Ton/Hr
Feed Rougher from Cyclone 1-2	0.11	0.27
Feed Rougher from Cyclone 3-4-5	0.29	0.70
Feed Rougher from Recycle	0.08	0.17
Concentrate Rougher	0.20	0.29
Tails Rougher	0.20	0.68

MAGNETIC SEPARATOR - SCAVENGER

Parameters	
Concentrate, Weight Fraction (<1)	0.8
Number of Separators Magnetic	4
Nickel Metallic Recovery, Weight Fraction (<1)	0.25
Nickel Total Recovery, Weight Fraction (<1)	0.2

	Ni Metallic Ton/Hr	Ni Total Ton/Hr
Feed Scavenger	0.20	0.68
Concentrate Scavenger	0.05	0.14
Tails Scavenger	0.15	0.54

MAGNETIC SEPARATOR - CLEANER

Parameters	
Concentrate, Weight Fraction (<1)	0.8
Number of Separators Magnetic	1
Nickel Metallic Recovery, Weight Fraction (<1)	0.7
Nickel Total Recovery, Weight Fraction (<1)	0.6

	Ni Metallic Ton/Hr	Ni Total Ton/Hr
Feed Cleaner from Rougher	0.20	0.29
Feed Cleaner from Scavenger	0.05	0.14
Concentrate Cleaner	0.18	0.25
Tails Cleaner	0.08	0.17

Los datos seleccionados en verde son de tipo exportación, entre estos se tiene:

- Toneladas/hora de níquel metálico y níquel total en la corriente que alimenta al equipo de separación magnética, corriente de concentrado y en las colas.

Los datos seleccionados en naranja son de tipo importación, entre estos se tiene:

- % sólidos en la corriente de concentrado.
- Numero de separadores magnéticos.
- % Recuperación de níquel metálico y níquel total.

3.3.5 Corrida de la simulación del modelo realizado para MNR

Aquí se obtienen los resultados previos del balance de material y predicción de la distribución granulométrica de cada una de las corrientes de las operaciones unitarias empleadas para el modelo del proceso de recuperación de níquel en la escoria de Cerro Matoso S.A.

3.4 INFORME FINAL

Se realizó el análisis de resultados obtenidos y se elaboró el informe final.

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Al momento de correr el modelo propuesto en METSIM[®], se obtiene como resultado preliminar el balance de material de las corrientes de cada operación unitaria, la predicción de la distribución granulométrica y el % de recuperación de concentrado de níquel.

4.1 Resultados preliminares Molienda

4.1.1 Empleando las ecuaciones de Bond

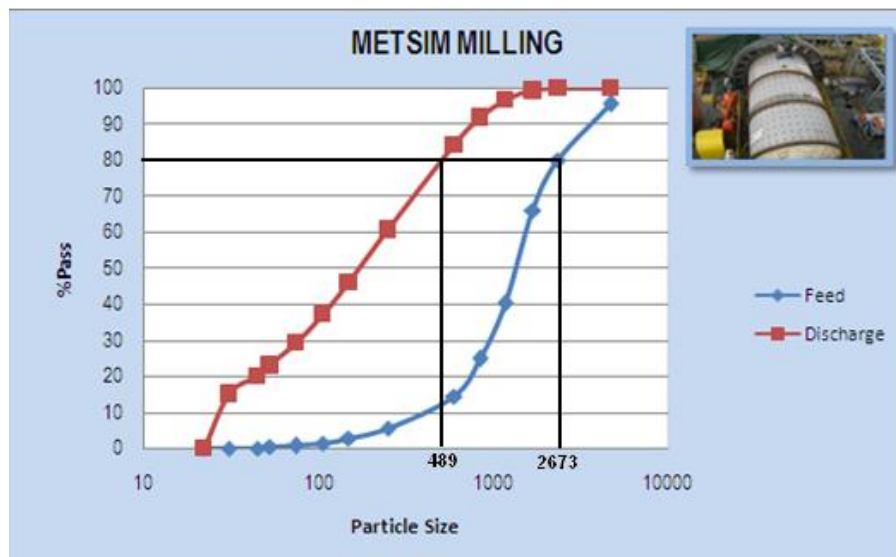
La operación unitaria de molienda emplea las ecuaciones de Bond (ver ANEXO A) para el cálculo de variables de operación y dimensionamiento del equipo. Teniendo en cuenta las dimensiones, parámetros requeridos como datos de entrada y los calculados por el simulador, al momento de correr el modelo se obtuvieron los siguientes resultados:

Ball Mill	Dimensions	Parameters	Reactions	Equil.	Heat Bal	Logic	Controls	Labor	Materials	Reagents	Notes
CO		1-Bond Inside length									Calculation option
ID	4.8006	* Diameter inside liners - m, ft									
IL	11.1	1 Length inside liners - m, ft									
P8	434.0524	2 P80 of mill classifier product, microns									
D8	463.9564	3 D80 of mill discharge, microns									
RM	13.17835	* Rpm of mill, or									
CS	0.6825	* Critical speed									
VP	0.4	* Volume ball loading									
BD	50.8	* Ball diameter									mm, in

- ✓ **ID** - Diámetro interno del molino de bolas.
- ✓ **P8** - Tamaño en micrones, en el cual el 80% de las partículas pasan a la siguiente etapa.
- ✓ **D8** - Tamaño en micrones, en el cual el 80% de las partículas son descargadas del molino de bolas.
- ✓ **RM** - rpm (revoluciones por minuto) del molino.
- ✓ **CS** - Velocidad crítica del molino.
- ✓ **BD** - Diámetro de las bolas (como entran al molino).

Los resultados obtenidos en METSIM® de predicción de la distribución granulométrica para la corriente de alimentación y descarga del molino de bolas al ingresar previamente datos de criterio de diseño (ver ANEXO C) de la planta MNR son:

Figura 10. Representación gráfica en Microsoft Excel de las curvas de distribución granulométrica para las corrientes de alimentación y descarga del molino de bolas



La figura 10 muestra las curvas de distribución granulométrica de la corriente de entrada y salida de escoria generada por el simulador al correr el modelo con los datos de criterio de diseño del molino de bolas.

La curva azul representa la distribución granulométrica de la escoria que alimenta al molino y la curva roja representa la distribución granulométrica de la corriente de descarga del proceso de molienda. En la corriente de alimentación el valor de F80 (tamaño de partícula del 80% pasante) calculado por el simulador fue de 2673 micras, éste valor es diferente al tamaño de partícula indicado en los datos de diseño de la planta (2000 micras), sin embargo, éste fue aceptado debido a que es el valor de F80 con el que actualmente está ingresando la escoria al proceso. Por otra parte, en la corriente de descarga del molino el valor de P80 calculado fue de 489 micras, un tamaño de partícula mayor al requerido para el producto de molienda. Esto pudo ser por varios factores, entre los cuales está el ingreso de escoria con un tamaño de partícula mayor al indicado en los datos de diseño, es decir, al momento de diseñar la planta de MNR, fue considerado el valor de F80 de la escoria que alimentaría al molino para determinar los parámetros requeridos y llegar a un F80 deseado, de forma tal que, si el F80 de la alimentación cambia, el P80 del producto cambiaría consecuentemente.

4.1.2 Empleando los coeficientes de función selección y función fractura.

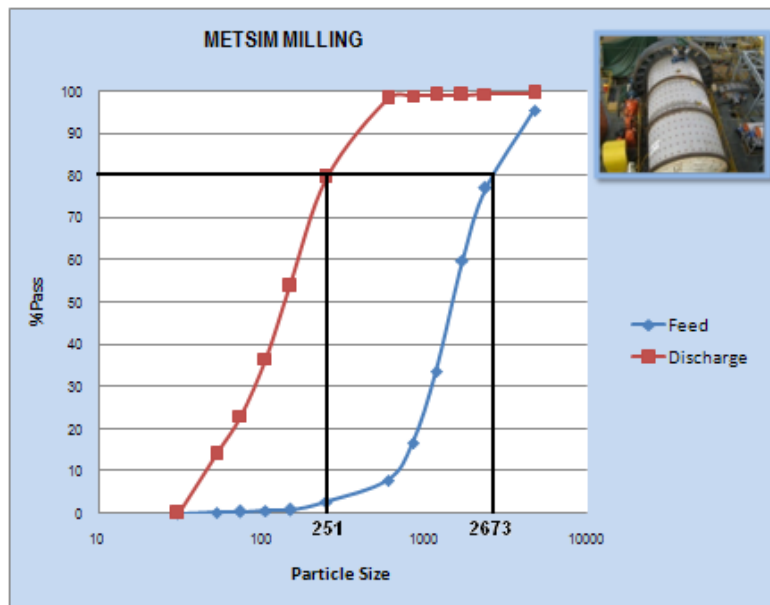
4.1.2.1 Ajuste del modelo: Al tener los resultados preliminares del proceso de molienda, fue necesario ajustar el modelo. Esto se logró al realizar la variación de los coeficientes de la función selección y fractura y se observó una fuerte incidencia de éstos en las curvas de distribución granulométrica, considerándolos parámetros críticos del modelo puesto que tienen un gran impacto sobre las características del producto final.

Los coeficientes de la función selección y función fractura dados por METSIM® inicialmente son los siguientes:

BE	1	* Breakage function coefficient		
Selection function coefficients:				
AA	0.5	0.5	0	0

Teniendo los resultados preliminares al emplear las ecuaciones de Bond, se realizó la variación manual de los coeficientes de la función selección y función fractura, se generó la siguiente gráfica:

Figura 11. Representación gráfica en Microsoft Excel de las curvas de distribución granulométrica para las corrientes de alimentación y descarga del molino de bolas después del ajuste del P80



Los valores dados para estos coeficientes fueron determinados de forma tal que la predicción de la distribución granulométrica en la corriente de descarga del molino de bolas se ajustara a un valor de P80 lo más cercano a 250 micras, el cual es el

valor óptimo al que por diseño se quiere llegar. Es necesario mencionar que la variación de estos coeficientes se encuentra dentro del rango permitido por METSIM[®] mostrado en la tabla 2.

Tabla 2. Rango normal de valores para los coeficientes de molienda

COEFICIENTES DE MOLIENDA	Rango	Recomendado
Breakage Function Coefficient	0.5 a 2.0	2.0
AA[1]	0.4 a 2.0	0.5
AA[2]	0.7 a 1.1	1.1
AA[3]	1000 a 4000	2000
AA[4]	1.0 a 4.0	4.0

La figura 11 muestra un valor de P80 de 251 micras como resultado al ingresar datos de diseño de planta, condiciones de operación y al realizar la variación de los coeficientes de la función selección y fractura mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Valores empleados para ajustar el P80 en la descarga del molino

PARÁMETRO	Valor
Breakage Function Coefficient	2.0
AA[1]	1.1
AA[2]	1.1
AA[3]	1600
AA[4]	3.0

4.2 Resultados Clasificación

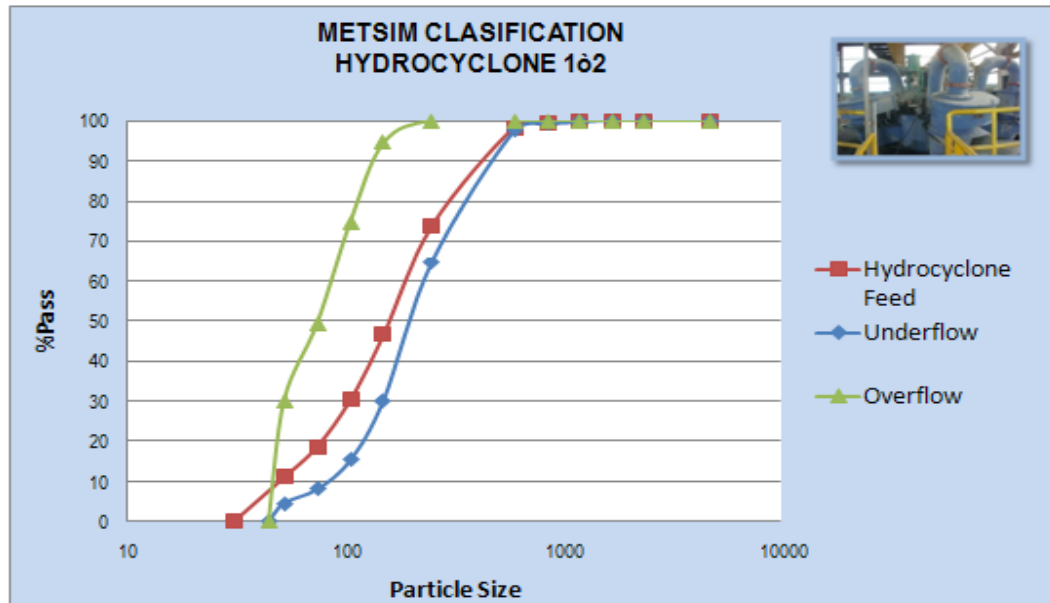
Los resultados obtenidos para la operación unitaria Hydrocyclone son los mostrados a continuación:

Materials		Reagents				Notes		
Hydrocyclone	Dimensions	Model Parameters	Reactions	Equil.	Heat Bal	Logic	Controls	Labor
Default values will be entered for zero values only. The diameter must be entered. Other dimensions will default.								
DC	650	* Diameter						
AI	13141.96	* Inlet area						
DI	129.3555	* Inlet diameter						
DV	175	* Vortex diameter						
DA	76.2	* Apex diameter						
HT	59.05511	* Vortex height						
SL	20	* Cone angle, normally 10.5 12 20						
Operating Parameters								
PS	0.82	* Desired underflow density						
RP	0	0	Pressure range, kPa or psi					
If non-zero values are entered for the pressure range, the number of cyclones will be adjusted to meet that pressure.								
PR	25.86633	- Calculated operating pressure-kPa, psi-REQUIRED FOR PARAM.						

- ✓ **AI** - Área de entrada
- ✓ **DI** - Diámetro de entrada
- ✓ **DV** - Diámetro de Vortex
- ✓ **DA** - Diámetro de Apex
- ✓ **HT** - Altura de Vortex
- ✓ **PR** - Presión de operación

Teniendo como resultado los datos del modelo de la operación unitaria Hydrocyclone, METSIM® genera una gráfica que predice la distribución granulométrica en la corriente de entrada y descarga del hidrociclón.

Figura 12. Representación gráfica en Microsoft Excel de las curvas de distribución granulométrica para las corrientes de alimentación y descarga de los hidrociclones 1 ò 2

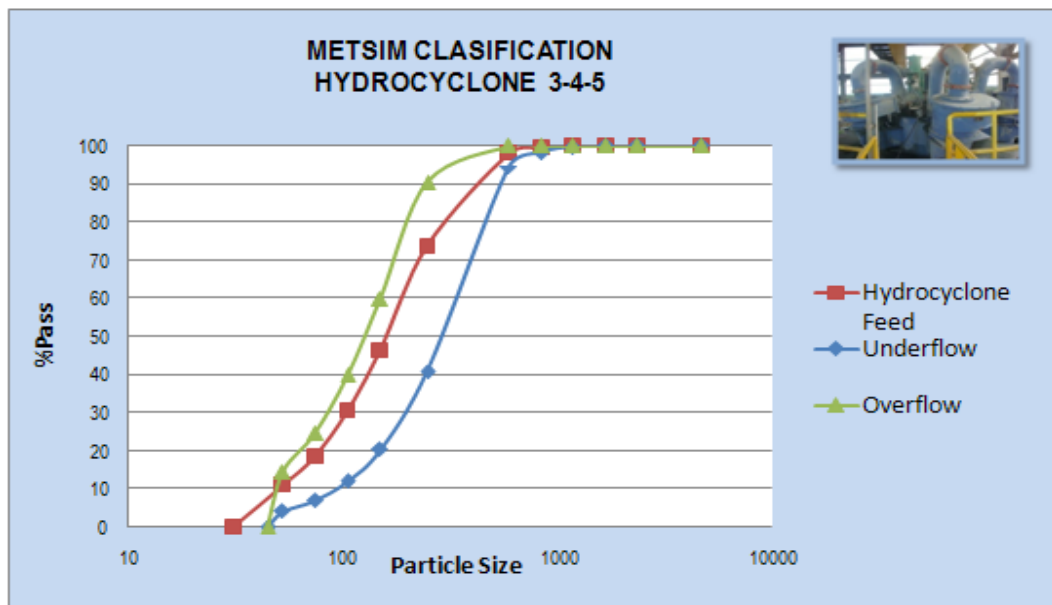


Las curvas mostradas en la figura 12 representan la distribución granulométrica de la escoria en la entrada del hidrociclón y en las salidas, Underflow (corriente de escoria gruesa que recircula al molino de bolas), Overflow (corriente de escoria fina clasificada) de los hidrociclones 1 ò 2.

El valor de P80 calculado al ingresar datos de diseño (diámetro de entrada del hidrociclón) y variables de operación (porcentaje de sólidos en la corriente de alimentación) es de 171 micras para Overflow (corriente de escoria fina) y de 425 micras para Underflow (corriente de escoria gruesa). El valor para la corriente de escoria fina indica que hay una sobremolienda, por lo que el 80% pasante de las partículas corresponden a un tamaño menor de 250 micras. Al ajustar las condiciones de operación y manteniendo fijo el diámetro de entrada del hidrociclón, se tiene como resultado un P80 en la corriente de escoria fina de 209

micras y un P80 en la corriente de escoria gruesa de 436 micras, de esta forma es reducida la sobremolienda teniendo así un tamaño de partícula requerido para una posterior separación más eficiente y de esta forma minimizar la producción de partículas excesivamente finas que interfieren en el proceso de recuperación del metal.

Figura 13. Representación gráfica en Microsoft Excel de las curvas de distribución granulométrica para las corrientes de alimentación y descarga de los hidrociclones 3-4-5



La figura 13 representa las curvas de distribución granulométrica de las corrientes de alimentación y descarga (Underflow y Overflow) de los hidrociclones 3-4-5. El valor de P80 calculado por el simulador al ingresar datos de diseño (diámetro de entrada del hidrociclón), variables de operación (porcentaje de sólidos en la corriente de alimentación y número de hidrociclones en servicio) es de 218 micras para la corriente de escoria fina y de 487 micras para la corriente de escoria gruesa. Al ajustar las condiciones de operación y manteniendo el diámetro de

entrada del hidrociclón y el número de hidrociclones que se encuentran normalmente en servicio, se tiene como resultado un P80 en la corriente de escoria fina de 219 micras y un P80 en la corriente de escoria gruesa de 548 micras. El valor de P80 para la corriente de escoria fina no varía mucho, sin embargo el valor de P80 para la corriente de escoria gruesa aumenta (corriente que recircula directamente al proceso de molienda), esto se logra variando el porcentaje de sólidos en la corriente de entrada al hidrociclón y al observar en la interfaz el % de recirculación al molino de bolas disminuye, lo que hace más eficiente esta etapa del proceso.

4.3 Resultados Separación Magnética

Para la etapa de separación magnética se obtuvieron resultados de recuperación de níquel total y níquel metálico que son visibles tanto en la interfaz como en el modelo.

Composición Química Concentrado				
REAL		METSIM		% ERROR
Components	%	Components	%	
Ni Metallic	0.10	Ni Metallic	0.10	0.61
NiO	0.27	NiO	0.27	1.58
Fe2O3	20.31	Fe2O3	20.34	0.16
MgO	19.67	MgO	19.59	0.38
SiO2	54.57	SiO2	54.64	0.14
Al2O3	2.81	Al2O3	2.82	0.47
CaO	0.46	CaO	0.46	0.47
Co3O4	0.02	Co3O4	0.02	0.47
Cr2O3	1.26	Cr2O3	1.25	0.43
MnO	0.49	MnO	0.48	1.33
P2O5	0.01	P2O5	0.01	0.47

Para validar este resultado, se comparó la composición química del concentrado final producto del proceso y la composición química del concentrado final producto de la simulación, obteniendo un % de error relativamente bajo.

4.4 Interfaz en Excel

Se creó una interfaz en Microsoft Excel que además de permitir de manera ágil y práctica tener en cuenta distintas variables, permite obtener diversas alternativas que encaminan hacia una optimización del circuito en general.

Al realizar la variación de los diferentes parámetros (diseño y operación) una vez ajustado el modelo, se observó lo siguiente:

- Longitud del molino: Si es disminuida la longitud interna del molino, el P80 en la corriente de descarga del molino aumenta. Por el contrario, si la longitud interna del molino aumenta, el P80 en la corriente de descarga del molino disminuye.

- % sólidos en la alimentación de escoria al proceso: El valor de % sólido en la alimentación de escoria fue establecido en 85%, dato que corresponde al empleado en la realidad. Si el % de sólidos en la alimentación de escoria aumenta el P80 en la corriente de descarga aumenta, de igual forma, si el % de sólidos en la alimentación disminuye, el P80 aumenta. Esto se explica porque: 1. Al tener un exceso de agua dentro del molino, ésta lavara las bolas y el mineral no estará pegado en las bolas, haciendo una pulpa demasiado fluida que saca la carga de mineral demasiado rápida, no dando tiempo a moler y dando como resultado una molienda excesivamente gruesa. 2. Al tener gran % de sólidos, la pulpa se hace cada vez más densa y avanzaría lentamente, las bolas no molerían porque se formaría una capa tan densa a su alrededor que impediría buenos golpes entre ellas.

- Carga de alimentación de escoria: La planta está diseñada con capacidad de 500 toneladas/hora secas de alimentación de material al proceso. Para

lograr un P80 (250 micras) en el producto, éste valor fue establecido en 450 toneladas/hora secas en el modelo, dato cercano a la realidad del proceso teniendo en cuenta que la escoria entra con un porcentaje de humedad de 10%. Al variar la carga de alimentación, se observó un comportamiento directamente proporcional con relación al P80. Al aumentar las toneladas de escoria, aumenta el P80 en la corriente de descarga y al disminuir la carga de escoria, disminuye el P80 en la descarga del molino.

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo del proceso de MNR (Metallic Nickel Recovery) de la unidad de negocios de Refinería en Cerro Matoso S.A. empleando el simulador METSIM® (Metallurgical Simulator, by PROWARE), para esto se identificaron las principales variables que afectan al modelo como lo son la distribución granulométrica de la escoria, parámetros de equipos (longitud del molino, diámetro del hidrociclón, número de equipos, etc.) y parámetros de operación (% carga de bolas al molino, flujo de alimentación, % sólidos).

Se creó una interfaz que permite de manera ágil la evaluación, ajuste, análisis y verificación de datos ingresados y obtenidos como resultado en cada operación unitaria simulada. Además permite tener en cuenta varias variables, diferentes combinaciones de datos, resultados y obtener diversas alternativas que encaminan hacia la optimización del circuito completo.

Se logró de manera sencilla la evaluación y análisis de los parámetros de operación, criterios de diseño y diferentes variables que influyen de manera relevante tanto en cada operación unitaria por separado como del circuito en conjunto, obteniendo resultados requeridos, todo esto ingresando previamente la información necesaria para hacer correr el modelo sin errores.

Con el objetivo de predecir una probable distribución granulométrica para el producto, se ajustó el modelo variando los coeficientes de la función selección y fractura, debido a que estos determinan en gran medida las condiciones de operación, disposición y características del mineral.

6. RECOMENDACIONES

Aun teniendo el importante apoyo de simuladores para cualquier tipo de proceso que se quiera optimizar y estudiar como lo es METSIM[®], es importante de igual forma al ingeniero para que se desarrolle la comprensión y análisis del comportamiento detallado de cada proceso en particular y de esta forma realizar posibles mejoras en la eficiencia y operación de una planta.

Como paso siguiente al desarrollo de este trabajo es necesario realizar la implementación del modelo propuesto por parte de ingeniería, para que analice y entienda de una forma más detallada el comportamiento del proceso.

Por otra parte, el proceso de recuperación de níquel metálico además de las etapas de molienda, clasificación y separación magnética consta de los sistemas de secado, manejo de concentrado de níquel, transporte y disposición de relave, por lo que se invita al desarrollo de futuros proyectos que formen parte de este y sirvan de complemento al modelo en general.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ROMÀN GARCÌA, Martha Stella. Simulacion en regimen permanente de un circuito de molienda-clasificaciòn para minerales de cobre. Universidad Industrial de Santander, Colombia, 1985.
- [2] OSPINA ALARCON, Manuel Alejandro. Diseño de un sistema de control multivariable para un circuito de molienda en húmedo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2009.
- [3] DUARTE, M. SEPÚLVEDA, F. CASTILLO, A. CONTRERAS, A. LAZCANO, V. JIMÉNEZ P. CASTELLI, L. A comparative experimental study of five multivariable control strategies applied to a grinding plant. Powder Technology Vol. 104, pp. 1-28, 1999.
- [4] FUERSTENAU, D.W. ABOUZEID, A.-Z.M. The energy efficiency of ball milling in comminution. International Journal of Mineral Processing. Vol. 67, pp 162, 2002.
- [5] GAUDIN, A.M. Principles of mineral dressing. McGraw-Hill Book, New York, N.Y., pp 97, 1939.
- [6] CONCHA, Fernando. AUSTIN, Leonard G. Diseño y simulaciòn de circuitos de Molienda y Clasificaciòn. Universidad de Concepciòn, Santiago de Chile, pp 4, 1972.
- [7] ÖZCAN, Ö. BENZER, H. Comparison of different breakage mechanisms in terms of product particle size distribution and mineral liberation. Comminution '10, Cape Town, South Africa, 2010.

- [8] SAHOO, A. ROY, G. K. Correlations for the Grindability of the Ball Mill As a Measure of Its Performance. Asia Pacific Journal of Chemical Engineering. pp 230-235, 2008.
- [9] HUAPAYA SANCHEZ, Alejandro. Operaciones en ingeniería química. Universidad Nacional de Ingeniería. Pp 2. 2009.
- [10] LYNCH, A.J. Mineral crushing and grinding circuits. Developments in mineral processing 1. Elsevier Scientific Publishing Company, pp 90, 1977.
- [11] I. du Plessis. Can cyclones improve grinding?. Comminution '10, Cape Town, South Africa, 2010.
- [12] GUTIERREZ, Leonel. SEPÚLVEDA, Jaime. Dimensionamiento y optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática. Santiago de Chile, pp 98, 1986.
- [13] REICHARDT, Roland. WEINHOLD, Fred. WIECHERT, Wolfgang. Particle based modelling of mechanical alloying by parallel Monte Carlo methods. Proceedings 21st European Conference on Modelling and Simulation. pp 1-6, 2007.
- [14] CHUCK, Daniel. CIRIBENI, Víctor. NUÑEZ, Enrique. Control automático de un circuito de molienda en húmedo con clasificación por hidrociclón: Su evaluación por simulación. Instituto de investigaciones mineras. Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1-8, 1997.

ANEXOS

ANEXO A. Ecuaciones de Bond empleadas para el modelo de la operación unitaria de molienda.

Velocidad crítica (CS) del molino de bolas:

$$CS = 76. \frac{63}{ID * 0.5}$$

Donde ID= Diámetro del molino de bolas

Diámetro de las bolas (BD) como entran al molino:

$$BD = \left[\frac{F8}{350} \right] * 0.5 * \left[\frac{WI * SG}{100 * CS * ID * 0.5} \right] * 0.34$$

Donde,

F8= Tamaño del 80% pasante en la alimentación

WI= Work Index

SG= Gravedad específica

CS= Velocidad crítica

ID= Diámetro interno del molino

Consumo de energía (KW) del molino:

$$SS = 0.5 * BD - \frac{3 - ID}{20}$$

$$KB = SS + 3.1 \times ID * 0.3 [3.2 - 3 \times VP] \times CS \times \left[1 - 0. \frac{1}{2 * (9 - 10 \times CS)} \right]$$

$$K = PF \times KB \times VP \times \frac{290}{2000} \times \frac{3.14 \times ID * 2}{4}$$

Donde,

E1 = 1 para molienda húmeda

E1 = 1.3 para molienda seca

E2 = OF = 1.2 para el tamaño que referencia el 80% pasante.

$$E3 = \left[\frac{8}{ID} \right] * 0.2$$

$$FO = 4000 \times \left[\frac{13}{WI} \right] * 0.5$$

$$RR = \frac{F8}{P8}$$

$$E4 = 1 + \frac{WI - 7}{RR} \times \frac{F8 - FO}{FO}$$

$$E5 = \frac{P8 + 10.3}{1.145 \times P8}$$

$$E7 = 1 + 0. \frac{26}{2 \times (R - 1.35)}$$

$$KW = K \times IL$$

$$K = TF \times E1 \times E2 \times E3 \times E4 \times E5 \times E7 \times 10 \times WI \times \left[\frac{1}{P8 * 0.5} - \frac{1}{F8 * 0.5} \right]$$

Para el circuito general:

TF = Nueva alimentación para el circuito

E2 = 1

Para solo el molino de bolas:

TF = Alimentación total para el molino de bolas.

E2 = OF = Factor de diseño de circuito abierto.

P8 = D8 = Tamaño del 80% pasante en la descarga del molino.

F8 = I8 = Tamaño del 80% pasante en la entrada del molino.

Tiempo de residencia en minutos (RT):

$$RT = \frac{0.4 \times VP \times IL \times 0.25 \times 3.14 \times ID * 2}{VCFM(\text{pies cubicos por minuto de alimentaciòn})}$$

Potencia del molino (HP):

$$HP = \frac{KW}{0.746}$$

ANEXO B. Ecuaciones empleadas para el modelo de la operación unitaria de clasificación por hidrociclones.

Tabla 4. Datos empleados para el cálculo de datos del hidrociclón.

TAMAÑO DEL HIDROCICLÓN	A	B	C	D
DC: Menor a 8 pulgadas	11.94195	0.69937	0.15895	0.83418
DC: Mayor a 8 pulgadas	10.16534	0.50519	0.32891	0.94019
Largo del hidrociclón	21.31572	0.00027	0.58702	0.92992

DC: Diámetro del hidrociclón.

Diámetro del vortex (DV):

$$DV = 0.35 \times DC$$

Área de la entrada (AI):

$$AI = 0.05 \times DC * 2$$

Diámetro de entrada (DA):

$$DA = 0.1 \times DC$$

Presión de operación (PR):

$$PR = 10 \times \left[\frac{GPM}{NO * F} \right] * 1.9225$$

NO: Numero de hidrociclones

$$F = A \times DC * B \times AI * C \times DV * D \times \exp[0.9236 \times VS * 1.34343]$$

VS = Volumen del porcentaje de sólidos en la alimentación.

D50 (en micrones):

$$C1 = [(TS - VS)/TS] * 1.43$$

$$C2 = 2 \times PR * 0.3$$

$$C3 = \left[\frac{1.65}{SGS - SGI} \right] * 0.5$$

$$D5 = C1 \times C2 \times C3 \times 5.297 \times DC * 0.66 \times \left[\frac{DV}{0.3 \times DC} \right] * 0.6 \times \left[\frac{AI}{0.05 \times DC * 2} \right]$$

ANEXO C. Criterios de diseño del proceso de molienda

Tabla 5. Criterios de diseño del proceso de molienda

DESCRIPCIÓN	Valor/Unidad
Tipo de Molino	Molino de Bolas
Tipo de Molienda	Húmeda
Número de unidades	1
Alimentación requerida (toneladas secas)	500 toneladas/hora
Factor de diseño	1.1
F80 alimentación al molino	2000 micras
P80 descarga del molino	250 micras
Work Index	25 kWh/t
Diámetro del molino	6.1 metros
Longitud del molino	11.1 metros
Volumen carga de bolas	40%
% Velocidad Crítica	76%
Velocidad de Rotación	13.2 rpm
Descarga del molino	Overflow
Diámetro de bolas	40 a 50 milímetros

ANEXO D. Variables importadas a METSIM®

Tabla 6. Variables importadas a METSIM®

Descripción de la Variable	Nombre de la Variable	Tipo
% Acumulado Pasante en la corriente de alimentación al molino	UVPASS	Vector
Alimentación de escoria al molino en Ton/hora	USAL	Escalar
Parámetros del molino	UVPARMOL	Vector
Parámetros del Hidrociclón 1-2	UVPARCICLON	Vector
Parámetros del Hidrociclón 3-4-5	UVPARCICLON2	Vector
% Sólidos en concentrado SCALPER	USSP	Escalar
Número de Separadores SCALPER	USNP	Escalar
% Sólidos en concentrado ROUGHER	USSP1	Escalar
Número de Separadores ROUGHER	USNP1	Escalar
% Sólidos concentrado SCAVENGER	USSP2	Escalar
Número de Separadores SCAVENGER	USNP2	Escalar
% Sólidos en concentrado CLEANER	USSP3	Escalar
Número de Separadores CLEANER	USNP3	Escalar
% Recuperación SCALPER	UVRECOVERY	Vector
% Recuperación ROUGHER	UVRECOVERY1	Vector
% Recuperación SCAVENGER	UVRECOVERY2	Vector
% Recuperación CLEANER	UVRECOVERY3	Vector

% Carga de bolas al Molino	USH	Escalar
Composición Química de escoria de alimentación	UVComposicion1	Vector
% Solidos en la corriente de alimentación del molino de bolas	USI	Escalar

ANEXO E. Variables exportadas a Excel.

Tabla 7. Variables exportadas a Excel

Descripción de la Variable	Nombre de la Variable
F80 (Tamaño 80% pasante en la alimentación al molino)	VP80 4
% Acumulado Pasante en malla #4 (4760 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (4760 VSIZ 5)
% Acumulado Pasante en malla #8(3360 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (2360 VSIZ 5)
% Acumulado Pasante en malla #12(1700 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (1700 VSIZ 5)
% Acumulado Pasante en malla #16(1180 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (1180 VSIZ 5)
% Acumulado Pasante en malla #20(850 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (850 VSIZ 5)
% Acumulado Pasante en malla #30(600 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (600 VSIZ 5)
% Acumulado Pasante en malla #60(250 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (250 VSIZ 5)
% Acumulado Pasante en malla #100(150 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (150 VSIZ 5)

% Acumulado Pasante en malla #140(106 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (106 VSIZ 5)
% Acumulado Pasante en malla #200(75 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (75 VSIZ 5)
% Acumulado Pasante en malla #270(53 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (53 VSIZ 5)
% Acumulado Pasante en malla #325(45 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (45 VSIZ 5)
% Acumulado Pasante en el fondo(31 micras) de la corriente de descarga del molino de bolas	100* (31 VSIZ 5)
P80 (Tamaño 80% pasante en la descarga del molino de bolas)	VP80 5
% Acumulado Pasante en malla #4 (4760 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (4760 VSIZ 9)
% Acumulado Pasante en malla #8(3360 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (2360 VSIZ 9)
% Acumulado Pasante en malla #12(1700 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (1700 VSIZ 9)
% Acumulado Pasante en malla #16(1180 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (1180 VSIZ 9)
% Acumulado Pasante en malla #20(850 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (850 VSIZ 9)

% Acumulado Pasante en malla #30(600 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (600 VSIZ 9)
% Acumulado Pasante en malla #60(250 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (250 VSIZ 9)
% Acumulado Pasante en malla #100(150 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (150 VSIZ 9)
% Acumulado Pasante en malla #140(106 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (106 VSIZ 9)
% Acumulado Pasante en malla #200(75 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (75 VSIZ 9)
% Acumulado Pasante en malla #270(53 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (53 VSIZ 9)
% Acumulado Pasante en malla #325(45 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (45 VSIZ 9)
% Acumulado Pasante en el fondo (31 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 1-2.	100* (31 VSIZ 9)
P80 (Tamaño 80% pasante en el Overflow del hidrociclón 1-2).	VP80 9
% Acumulado Pasante en malla #4 (4760 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (4760 VSIZ 10)
% Acumulado Pasante en malla #8(3360 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (2360 VSIZ 10)

% Acumulado Pasante en malla #12(1700 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (1700 VSIZ 10)
% Acumulado Pasante en malla #16(1180 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (1180 VSIZ 10)
% Acumulado Pasante en malla #20(850 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (850 VSIZ 10)
% Acumulado Pasante en malla #30(600 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (600 VSIZ 10)
% Acumulado Pasante en malla #60(250 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (250 VSIZ 10)
% Acumulado Pasante en malla #100(150 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (150 VSIZ 10)
% Acumulado Pasante en malla #140(106 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (106 VSIZ 10)
% Acumulado Pasante en malla #200(75 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (75 VSIZ 10)
% Acumulado Pasante en malla #270 (53 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (53 VSIZ 10)
% Acumulado Pasante en malla #325(45 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (45 VSIZ 10)
% Acumulado Pasante en el fondo (31 micras) de de la corriente Underflow en el hidrociclón 1-2.	100* (31 VSIZ 10)

P80 (Tamaño 80% pasante en el Underflow del hidrociclón 1-2).	VP80 10
% Acumulado Pasante en malla #4 (4760 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (4760 VSIZ 14)
% Acumulado Pasante en malla #8(3360 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (2360 VSIZ 14)
% Acumulado Pasante en malla #12(1700 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (1700 VSIZ 14)
% Acumulado Pasante en malla #16(1180 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (1180 VSIZ 14)
% Acumulado Pasante en malla #20(850 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (850 VSIZ 14)
% Acumulado Pasante en malla #30(600 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (600 VSIZ 14)
% Acumulado Pasante en malla #60(250 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (250 VSIZ 14)
% Acumulado Pasante en malla #100(150 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (150 VSIZ 14)
% Acumulado Pasante en malla #140(106 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (106 VSIZ 14)
% Acumulado Pasante en malla #200(75 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (75 VSIZ 14)

% Acumulado Pasante en malla #270(53 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (53 VSIZ 14)
% Acumulado Pasante en malla #325(45 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (45 VSIZ 14)
% Acumulado Pasante en el fondo (31 micras) de la corriente Overflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (31 VSIZ 14)
P80 (Tamaño 80% pasante en el Overflow del hidrociclón 3-4-5).	VP80 14
% Acumulado Pasante en malla #4 (4760 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (4760 VSIZ 22)
% Acumulado Pasante en malla #8(3360 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (2360 VSIZ 22)
% Acumulado Pasante en malla #12(1700 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (1700 VSIZ 22)
% Acumulado Pasante en malla #16(1180 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (1180 VSIZ 22)
% Acumulado Pasante en malla #20(850 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (850 VSIZ 22)
% Acumulado Pasante en malla #30(600 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (600 VSIZ 22)
% Acumulado Pasante en malla #60(250 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (250 VSIZ 22)

% Acumulado Pasante en malla #100(150 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (150 VSIZ 22)
% Acumulado Pasante en malla #140(106 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (106 VSIZ 22)
% Acumulado Pasante en malla #200(75 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (75 VSIZ 22)
% Acumulado Pasante en malla #270 (53 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (53 VSIZ 22)
% Acumulado Pasante en malla #325(45 micras) de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (45 VSIZ 22)
% Acumulado Pasante en el fondo (31 micras) de de la corriente Underflow en el hidrociclón 3-4-5.	100* (31 VSIZ 22)
P80 (Tamaño 80% pasante en el Underflow del hidrociclón 3-4-5).	VP80 22
Flujo másico del componente 2 en la corriente 10	2 VCWT 10
Flujo másico del componente 2 en la corriente 11	2 VCWT 11
Flujo másico del componente 2 en la corriente 12	2 VCWT 12
Flujo másico del componente 2 en la corriente 13	2 VCWT 13
Flujo másico del componente 2 en la corriente 14	2 VCWT 14

Flujo másico del componente 2 en la corriente 16	2 VCWT 16
Flujo másico del componente 2 en la corriente 17	2 VCWT 17
Flujo másico del componente 2 en la corriente 19	2 VCWT 19
Flujo másico del componente 2 en la corriente 19	2 VCWT 21
Flujo másico del componente 3 en la corriente 10	3 VCWT 10
Flujo másico del componente 3 en la corriente 11	3 VCWT 11
Flujo másico del componente 3 en la corriente 12	3 VCWT 12
Flujo másico del componente 3 en la corriente 13	3 VCWT 13
Flujo másico del componente 3 en la corriente 14	3 VCWT 14
Flujo másico del componente 3 en la corriente 16	3 VCWT 16
Flujo másico del componente 3 en la corriente 17	3 VCWT 17
Flujo másico del componente 3 en la corriente 19	3 VCWT 19
Flujo másico del componente 3 en la corriente 21	3 VCWT 21
Flujo másico total de la corriente 5	VSTR 5

Flujo másico total de la corriente 9	VSTR 9
Flujo másico total de la corriente 10	VSTR 10
Flujo másico total de la corriente 14	VSTR 14
Flujo másico total de la corriente 22	VSTR 22

ANEXO F. Funciones APL empleadas en el modelo.

Tabla 8. Funciones APL empleadas en el modelo

FUNCIÓN APL	Descripción
VP80 S	Retorna el 80% pasante del tamaño de partículas en micrones en una corriente específica (S).
M VSIZ S	Retorna una matriz de la fracción pasante de partículas que pasan por un tamaño específico en micrones M en una corriente determinada S.
VSTR S	Retorna el flujo de masa de una corriente, o el flujo de masa de uno o más componentes específicos en una o varias corrientes determinadas.
C VCWT S	Retorna el flujo de masa de un componente C en una corriente S.

ANEXO G. Controladores activos y expresiones en el modelo de MNR.

METALLIC NICKEL RECOVERY (MNR) CMSA

FLOWRATE CONTROLS

LOOP SEC OP
3 1 7 ON Adj Stream 3, Control alimentación de escoria al proceso
Set Point - 500.000, USAL
Value Fnc. - 500.000, VSTR 3

PERCENT STREAM CONTROL

LOOP SEC OP
1 1 3 ON Adj Stream 2, Control de porcentaje de Solidos en la Alimentacion al molino
Set Point - 0.85000, 0.85
Value Fnc. - 0.85000, Percent Solids
2 1 6 ON Adj Stream 8, Control de % solido en la alimentacion al hidrociclón
Set Point - 0.64600, 0.646
Value Fnc. - 0.69742, Percent Solids

UNIT OPERATION CONTROL EXPRESSIONS

Operation 2
CtB: IL+UVPARMOL[1] ♦ WI+UVPARMOL[2] ♦ PF+UVPARMOL[3] ♦ OF+UVPARMOL[4] ♦ BE+UVPARMOL[5]
♦ AA[1]+UVPARMOL[6] ♦ AA[2]+UVPARMOL[7] ♦ AA[3]+UVPARMOL[8] ♦ AA[4]+UVPARMOL[9]
Operation 4
CtB: DC+UVPARCICLON[1] ♦ NO+UVPARCICLON[2] ♦ PS+UVPARCICLON[3]
Operation 5
CtB: PS+USSP ♦ NO+USNP