



**DOCUMENTACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA
REDACCIÓN DEL ESTUDIO DE LA FASE DE IDENTIFICACIÓN DEL
PROYECTO UPGRADING FASE II EN CERRO MATOSO S.A.**

CÉSAR MAURICIO SÁNCHEZ GUERRERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**

Bucaramanga

2008





**DOCUMENTACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA
REDACCIÓN DEL ESTUDIO DE LA FASE DE IDENTIFICACIÓN DEL
PROYECTO UPGRADING FASE II EN CERRO MATOSO S.A.**

CÉSAR MAURICIO SÁNCHEZ GUERRERO

**Proyecto de Grado para Optar al Título de:
Ingeniero Metalúrgico**

Tutor:

**Víctor Darío Meléndez Flores
Ingeniero Metalúrgico - UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2008**



DEDICATORIA

Este trabajo de grado va dedicado con todo el Amor del mundo a las siguientes personas:

A Dios,

A mis padres: Martha Cecilia Guerrero Ardila y Cesar Sánchez Ortiz,

A las familias: Sánchez - Guerrero,

A Natalia Rodríguez Galvis,

A mis compañeros(as) de clases,

A mis amigos(as) de infancia,

Y a todas aquellas personas que me han sido mi apoyo e inspiración en el transcurso de mi corta vida.

César Mauricio Sánchez Guerrero



AGRADECIMIENTOS

Agradezco muy afectuosa y sinceramente a las siguientes personas:

Ing. Luis Emilio Forero Gómez (UIS), Ing. Iván Uribe Pérez (UIS), Ing. Víctor Darío Meléndez Flóres (CMSA), Ing. José Agustín Duran Sánchez (CMSA), Ing. Rodrigo Guzmán Arteaga (CMSA), Fanny Pérez Clameran (CMSA), Ing. Gustavo Neira (UIS), Ing. Orlando Gómez (UIS), Ing. Custodio Vásquez (UIS), Ing. Darío Yesid Peña (UIS), Ing. Arnaldo Alonso Baquero (UIS), Ing. Luz Amparo Quintero (UIS), Ing. Afranio Cardona Granados (UIS), Ing. Orlando Aguirre (UIS), Ing. Walter Pardave Livia (UIS), Ing. Julio Elías Pedraza (UIS), Ing. Jhon Freddy Palacios (UIS), Ing. Wilson Vesga (UIS), Orlando Buitrago, Alcira Navas, a los técnicos: Mario, Fermín, Daniel, Javier y Ambrosio, a la Escuela de Ing. Metalúrgica y facultad de Fisicoquímicas UIS. A todos mis amigos(as) y compañeros(as) de U; pero en especial a todas aquellas personas involucradas directa o indirectamente con la ejecución de este proyecto.

A los anteriores mil y mil gracias.



CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO	17
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo General	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
1.2 SITUACIÓN ACTUAL DE CERRO MATOSO S.A. (CMSA)	18
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	20
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO	20
2. CERRO MATOSO S.A.	22
3. FUNDAMENTACIÓN TEORICA	23
3.1 EL NÍQUEL	23
3.1.1 Generalidades	23
3.1.2 Propiedades Atómicas.	23
3.1.3 Propiedades Físicas y Químicas.	23
3.1.4 Aplicaciones	24
3.1.5 Información Geoquímica	25
3.2 BENEFICIO DE MINERALES	26
3.2.1 Trituración	27



3.2.2	Clasificación o Tamizado	27
3.2.3	Concentración	27
3.2.4	Deshidratación	28
3.3	CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS	29
3.3.1	Análisis Diferencial y Acumulativo del Tamaño de Partículas.	30
3.3.2	Análisis por Tamizado.....	31
3.4	TRITURACIÓN Y MOLIENDA	33
3.4.1	Características de los Productos Triturados.....	34
3.4.2	Requerimientos Energéticos	35
3.4.3	Eficiencia de la desintegración.....	35
3.4.4	Ley de Bond e Índice de Bond.	36
3.5	EQUIPOS PARA LA REDUCCIÓN DE TAMAÑOS	38
3.5.1	Trituradoras.....	39
3.5.1.1	Trituradoras de Mandíbulas.....	39
3.5.1.2	Trituradoras Giratorias.....	41
3.5.1.3	Trituradora de Rodillos Lisos	42
3.5.1.4	Trituradoras de Rodillos Dentados	43
3.5.2	Molinos.....	43
3.5.2.1	Molinos de Martillos e Impactores	44
3.5.3	Molinos de Volteo.....	45
3.6	EQUIPOS DE TAMIZADO	46
3.6.1	Tamices y Parrillas Estacionarias.....	47
3.6.2	Tamices Vibratorios.....	48
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	49



4.1	FASE DE INDUCCIÓN	51
4.2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	52
4.3	ANÁLISIS DE ESTÁNDARES DE INVERSIÓN – BHP BILLITON	53
4.3.1	Estándar para un Estudio de la Fase de Identificación (SIPS).....	54
4.3.1.1	Definición del SIPS	54
4.3.1.2	Propósito del SIPS.....	54
4.3.1.3	Alcance del Estudio	54
4.3.1.4	Estudio de Identificación.....	55
4.4	PLANIFICACIÓN DE ACTIVIDADES	55
4.5	EJECUCIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE ACTIVIDADES	57
4.6	REDACCIÓN DEL ESTUDIO DE IDENTIFICACIÓN	58
5.	DESCRIPCION DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS	60
5.1	ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS	60
5.1.1	Proceso Actual	60
5.1.2	Alternativa I: Planta de concentración externa a la línea de proceso actual.....	65
5.1.3	Alternativa II: Planta de concentración dentro de la línea de proceso actual.....	66
5.1.4	Alternativa III. Planta de concentración en la cual se introduce el molino autógeno tipo BARMAC como una variante a las alternativas propuestas.	68
5.2	ANÁLISIS DE LOS ESTUDIOS PRELIMINARES DE CONCENTRABILIDAD	69
5.2.1	Estudio de Implementación del Upgrading Fase I.....	70
5.2.2	Estudio de Concentrabilidad del Material de Rechazo del Upgrading Fase I.....	71
5.2.3	Pruebas de Concentrabilidad para Tipos de Roca Puras.....	72



5.2.4	Caracterización y Concentrabilidad para Mezclas de Tipos de Roca y Localización del Sitio Óptimo de Concentración	73
5.2.5	Conclusiones Finales de los Ensayos Preliminares.	75
5.3	VALIDACIÓN DEL DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA DE CONCENTRACIÓN DE NIQUEL UPGRADING FASE II	75
5.3.1	Procedimiento General de los Ensayos en Planta Piloto.	79
5.3.2	Ensayos de Concentrabilidad Realizados	81
5.3.3	Estimación de la Generación de Finos.....	83
5.3.4	Generación Actual de Finos	84
5.3.5	Análisis de Resultados de los Ensayos en Planta Piloto.....	85
5.3.6	Conclusiones y Recomendaciones de los ensayos en planta piloto.	87
5.4	ANÁLISIS DE RIESGOS PARA EL PROYECTO UPGRADING FASE II ..	88
5.4.1	Situaciones de Riesgo.....	88
5.4.2	Estrategias de Control de Riesgos.....	89
5.4.3	Plan de Dirección de Riesgos.	89
5.5	PLAN DE TRABAJO PARA LA SIGUIENTE FASE DE SELECCION	90
5.5.1	Objetivo del Estudio de la Fase de Selección	90
5.5.2	Entregables del Estudio de la Fase de Selección	91
5.5.3	'Killers' Potenciales del Proyecto.....	91
6.	CONCLUSIONES	93
7.	RECOMENDACIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA	96

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Proceso de Construcción de Pilas en la planta de CMSA	22
Figura 2. Análisis Diferencial de Distribución de Tamaños	30
Figura 3. Análisis Acumulativo de Distribución de Tamaños.....	31
Figura 4. Análisis Acumulativo por el Método de Tamizado.....	33
Figura 5. Triturador de Mandíbulas de Blake	40
Figura 6. Trituradora Giratoria.....	41
Figura 7. Trituradora de Rodillos Lisos	42
Figura 8. Impactor (similar al molino de martillos).....	45
Figura 9. Molino de Volteo	46
Figura 10. Movimiento de los Tamices. (a) giro horizontal; (b) giro vertical; (c) giro en un extremo y sacudida en otro; (d) sacudida; (e) vibración mecánica y (f) vibración eléctrica.	47
Figura 11. Tamiz Vibratorio.....	48
Figura 12. Fases de Aprobación para Nuevos Proyectos en CMSA.....	50
Figura 13. Frente de Explotación Mina	61
Figura 14. Etapa de Trituración y Transporte del Mineral a Pilas	61
Figura 15. Funcionamiento del Apilador Móvil	62
Figura 16. Unidad de Negocios de RKEF (Rotary Kiln Electric Furnace).....	63
Figura 17. Cerros o Botaderos de Escoria en CMSA.....	63
Figura 18. Zona de Manejo de Producto Terminado.....	64
Figura 19. Diagrama de flujo del proceso actual de CMSA	65
Figura 20. Diagrama de flujo propuesto para la alternativa I.....	66
Figura 21. Diagrama de flujo propuesto para la alternativa II.....	67



Figura 22. Diagrama de flujo propuesto para la alternativa III.....	69
Figura 23. Puntos de Muestreo de los Ensayos Preliminares.....	70
Figura 24. Concentrabilidad del Material de Rechazo del UGI	71
Figura 25. Concentrabilidad para Tipos de Rocas Puras.....	73
Figura 26. Concentrabilidad para Mezclas de Tipos de Rocas	74
Figura 27. Diseño Conceptual de la Planta de Concentración Upgrading II	76
Figura 28. Diagrama de Bloque de Operaciones Unitarias del Circuito de Concentración Upgrading II	78
Figura 29. Diagrama de Flujo de la Planta Piloto de Concentración	79
Figura 30. Curva de Distribución Granulométrica para los Ensayos en Planta Piloto	84
Figura 31. Caracterización Metalúrgica del Material Analizado	85



LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Resultados Obtenidos del Análisis de Tamizado.....	32
Tabla 2. Índices de trabajo para trituración seca o molienda húmeda de algunos materiales.....	38
Tabla 3. Metodología de Trabajo Propuesta.....	56
Tabla 4. Resultado del Balance de Masa de los Ensayos en Planta Piloto.....	82
Tabla 5. Distribución Granulométrica del Ensayo de Concentrabilidad.....	83



RESUMEN

TITULO: DOCUMENTACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA REDACCIÓN DEL ESTUDIO DE LA FASE DE IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO UPGRADING FASE II EN CERRO MATOSO S.A.*

AUTOR: CESAR MAURICIO SANCHEZ GUERRERO**

PALABRAS CLAVES: Estudio de identificación, Upgrading fase II, Cerro Matoso S.A., Níquel, beneficio de minerales, concentración de minerales niquelíferos, planta de concentración.

DESCRIPCIÓN: El proyecto Upgrading Fase II, surge como necesidad de la compañía Cerro Matoso S.A. (empresa productora y explotadora de Níquel) de buscar una solución definitiva al panorama enfrentado actualmente en el cual, la disminución del grado de Níquel proveniente de Mina, la no utilización de recursos con ley de corte superior a la actual, el aumento del material de rechazo proveniente de la etapa de concentración (Upgrading Fase I) y el incremento en la cantidad de material almacenado en los stocks intermedios, han inducido un efecto negativo en el beneficio económico de la compañía y de sus principales inversores.

Es por tal motivo, que el proyecto Upgrading Fase II, tiene como principal objetivo la construcción de una planta de concentración del mineral proveniente de Mina, basándose en métodos físico-mecánicos de separación, aprovechando características fisicoquímicas de cierto tipo de rocas que constituyen el material alimentado a la línea de producción en CMSA.

Para lograr su objetivo principal, se debe demostrar la viabilidad técnica y económica del proyecto, por medio de un estudio que cumpla con los requerimientos mínimos de los estándares de capital y políticas de inversión de BHP Billiton para el desarrollo de nuevos proyectos. Este trabajo describe la metodología implementada para la documentación, recopilación de información y redacción del estudio de Identificación para el proyecto Upgrading Fase II que demuestra la viabilidad técnica y económica del proyecto por medio del análisis de estudios preliminares y ensayos de concentrabilidad realizados al cuerpo mineral.

* Trabajo de grado. Modalidad práctica empresarial.

**Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Tutor: Víctor Darío Meléndez Flóres.



ABSTRACT

TITLE: DOCUMENTATION AND COLLECTION OF INFORMATION FOR THE STUDY FOR THE IDENTIFICATION PHASE OF THE PROJECT UPGRADING PHASE II IN CERRO MATOSO S.A.*

AUTHOR: CESAR MAURICIO SANCHEZ GUERRERO**

KEY WORDS: Identification study, upgrading, Cerro Matoso S.A., Nickel, mineral beneficiation, concentration of nickel minerals, concentration plant.

DESCRIPTION: The Project Upgrading Phase II, arises from the necessity of Cerro Matoso S.A. (company producer of nickel) of looking at a definitive solution of the situation faced currently, where the decrease of the nickel grade coming from Mine, the non-use of resources with cut off grade above the current, the increase of reject material coming from concentration stage (Upgrading phase I), and the increment in the amount of material in the intermediate stocks, have induced a negative effect in the economic benefit of the company and their major investors.

It is for this reason that the primary objective of the project Upgrading Phase II, is the construction of a concentration plant for mineral from mine, based on physical-mechanical separation methods taking advantage physicochemical characteristics of certain type of rocks that constitute the material fed to the production line in CMSA.

To achieve its main objective, the technical and economical feasibility of the project should be demonstrated, by means of a study that fulfills the minimum requirements of capital and the political standard of investment of BHP Billiton for the development of new projects. This document describes the methodology implemented to document, collect for information and write the study of identification for the project Upgrading Phase II that demonstrates the technical and economical feasibility of the project by means of the analysis of preliminary studies and concentration tests carried out on the ore body.

* Work Graduation. Modality: Enterprise Practical.

** Faculty of Engineering Physical-chemistries. Metallurgical Engineering School and Materials Science. Tutor: Víctor Darío Meléndez Flóres.



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la búsqueda de oportunidades de mejoramiento y/o optimización de recursos dentro de los procesos productivos, enfocados en particular a la industria minera tanto en Colombia como en el mundo entero, han tenido una evolución sustancial en la última década, tratando de mitigar la escasez de sus reservas minerales, las pérdidas de material de rechazo dentro de sus líneas de producción, el descenso en la ley del mineral explotado, la contaminación ambiental producida y demás factores, que inducen un efecto negativo en los indicadores económicos de cada compañía, representando pérdidas millonarias para sus inversores. Además, los altos precios por libra de Níquel, alcanzados en estos últimos dos años, han motivado a la industria minera colombiana a formar parte de ésta tendencia mundial de optimización de recursos.

Por tal motivo, la compañía Cerro Matoso S.A. a partir de la Unidad de Negocios Proyectos de Producción, desarrolló un plan estratégico para localizar y atacar, aquellas posibles áreas de mejoramiento dentro del diagrama de proceso actual de producción; encontrándose una importante oportunidad de optimización del recurso mineral a partir del proceso de concentración mineral denominado “Upgrading”.

Este trabajo, contiene los requerimientos mínimos consignados en los estándares de inversión capital para nuevos proyectos por parte de BHP Billiton, en referencia a la recopilación de información, documentación y redacción del estudio de la fase de Identificación del proyecto Upgrading Fase II, desarrollado como parte de la práctica empresarial en Cerro Matoso S.A. y presentado aquí como requisito de grado para optar por el título de Ingeniero Metalúrgico.



El proyecto Upgrading Fase II, consiste en la construcción de una planta de concentración de mineral, inexistente actualmente en Cerro Matoso S.A., que por métodos físico-mecánicos, incremente el grado de Níquel de cierto tipo de rocas con características fisicoquímicas específicas que son alimentadas al proceso de producción actual. Esta nueva planta de concentración, estaría ubicada entre las Unidades de Negocios de Mina y Preparación de Minerales.

Por tal motivo es de principal orgullo y satisfacción personal, haber podido ser parte activa de la planeación y ejecución de esta primera fase del proyecto Upgrading Fase II.

1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

- Elaborar el documento final para la fase de Identificación del proyecto Upgrading fase II, documentando y recopilando la información clave para su elaboración con base en los requerimientos mínimos descritos en el módulo de capital de inversión de BHP Billiton “Estándar para un estudio de la fase de Identificación”.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar que el contenido del documento final de la fase de Identificación del proyecto Upgrading Fase II, cumpla con la normatividad de BHP Billiton requerida para la presentación y aprobación del proyecto por parte de la junta directiva de CMSA.
- Contribuir en la validación del diseño conceptual propuesto por el equipo líder y el asesor externo del proyecto para la planta de concentración Upgrading Fase II, por medio del análisis de distribución granulométrica de los resultados obtenidos en los ensayos realizados en la planta piloto.

- Determinar la concentrabilidad para los diferentes tipos de rocas y mezclas presentes en el depósito mineral, así como para los materiales almacenados en Stocks intermedios y provenientes de la corriente de rechazo del Upgrading Fase I en Cerro Matoso S.A, evaluando los estudios preliminares de concentrabilidad realizados con anterioridad, bajo la ley de corte actual de Níquel.
- Establecer un balance de masa global utilizando los datos promedios obtenidos en los ensayos en la planta piloto, para cuantificar técnicamente el diagrama de flujo propuesto de la planta de concentración.

1.2 SITUACIÓN ACTUAL DE CERRO MATOSO S.A. (CMSA)

En la actualidad CMSA cuenta con 17.8 millones de toneladas de recursos minerales no explotados con una ley de Níquel de 1.02%. Adicionalmente y debido a la naturaleza del depósito mineral, el cargue de los distintos materiales como alimento al proceso de producción de Ferro Níquel (FeNi), lleva normalmente asociado pequeñas cantidades de material estéril que afectan la calidad final del producto y representan altos costos de proceso.

Aun cuando no se tiene un valor estimado, con base en los resultados del proceso actual de Upgrading I (etapa de concentración después de los secadores) y por la experiencia de otras operaciones, se estima en un 5% la cantidad de material diluyente procesado, lo cual representa cerca de 150,000 ton/año adicionales de material estéril.



Las especificaciones mínimas requeridas para que el mineral proveniente de la mina sea apto para entrar a formar parte del proceso de producción, se han convertido en el principal motivo de restricción del proceso. Las estrechas especificaciones en cuanto a composición química, no permiten mezclar todos los materiales con contenidos de Níquel mayor a la ley de corte de 1.0% de Ni propuesta por la unidad de negocios de Mina. Estos materiales son almacenados en los stocks intermedios sin ser utilizados.

Tomando como premisa el último Plan de Vida de Mina, se estimó en 20 millones de toneladas la cantidad de materiales que quedarían en Stocks con las condiciones actuales del proceso, con una ley promedio de 1.32% de Ni. La cantidad de material almacenado en Stocks intermedios continuará creciendo con el paso del tiempo.

De la misma forma se han estimado en 6 Millones de toneladas con una ley de 1.30% Ni los recursos remanentes en los respaldos de los bancos después de minar todo el Pit final, así como otros potenciales recursos en los hallazgos de exploración en poblaciones aledañas a Montelíbano, que no están siendo explotados actualmente.

Finalmente, el grado de Níquel del mineral proveniente de la mina y alimentado al proceso descende continuamente; a este panorama se suma la cantidad cada vez mayor de material de rechazo proveniente del Upgrading Fase I.

El proyecto Upgrading fase II busca dar solución a estos problemas por medio de la implementación de una planta de concentración preliminar, que incremente la ley de Níquel en el mineral que constituye la pila de alimentación al proceso actual, disminuya la cantidad de material estéril alimentado al proceso, aproveche el



material de los stocks intermedios e incrementa la vida de la mina y de la compañía.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto busca documentar y recopilar la información necesaria para demostrar la viabilidad técnica del proyecto Upgrading Fase II, que se orienta a aumentar el grado de Níquel alimentado al proceso, basándose en métodos mecánicos de concentración de algunos tipos de rocas con características físico-químicas específicas. Con este proyecto se busca dar mayor flexibilidad a la mina, incorporando al proceso los materiales almacenados en stocks intermedios, reducir los costos de operación y utilizar el material de rechazo del Upgrading Fase I.

Upgrading Fase II describe una importante oportunidad de negocio para aumentar la producción de Níquel, incrementando las reservas de la mina y aumentando el VPN (valor presente neto) de la compañía. Esta oportunidad de negocio está encaminada dentro de los lineamientos y marcos de referencia estratégicos descritos por BHP Billiton.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

La documentación y recopilación de la información desarrollada por la Unidad de Negocios de Proyectos de Producción para la elaboración del informe final del estudio de la fase de Identificación del proyecto Upgrading fase II, es la ventana principal a mostrar para vender ó mercadear el proyecto a BHP Billiton y asegurar



así la aprobación del presupuesto necesario para continuar con el desarrollo de la investigación.

Este trabajo presenta todas las consideraciones principales, consignadas en el estudio de Identificación entregado a la compañía, para demostrar la viabilidad técnica del proyecto y su potencial económico, asegurando su acreditación a la siguiente fase. Este trabajo de grado se basa en los sistemas de inversión de BHP Billiton y cumple con la normatividad propuesta en los estándares de políticas de inversión y estudio de la fase de Identificación.

2. CERRO MATOSO S.A.

Figura 1. Proceso de Construcción de Pilas en la planta de CMSA



Cerro Matoso S.A. es una empresa productora y explotadora de Níquel. Su planta de producción está ubicada en el municipio de Montelíbano, perteneciente al departamento de Córdoba, al Norte de la Costa Colombia. En la figura 1, se observa parte de su infraestructura y funcionamiento durante el proceso de construcción de pilas del mineral alimentado a calcinadores.

CMSA inició su proceso productivo desde el año 1982, partiendo de un depósito de lateritas de Níquel, el cual sirve actualmente como fuente proveedora de su materia prima, para obtener como producto final Ferroníquel con un 45% de Ni, por medio de tratamientos pirometalúrgicos de reducción de minerales oxidados con altos contenidos de Níquel; alcanzando una producción de 55.000 toneladas de Níquel por año aproximadamente.

3. FUNDAMENTACIÓN TEORICA

3.1 EL NÍQUEL

3.1.1 Generalidades. El Níquel es un elemento químico de número atómico 28 y símbolo Ni, situado en el grupo 10, periodo 4 y bloque d de la tabla periódica de los elementos. Es un metal de transición, ferromagnético, de aspecto blanco plateado, cuya densidad es 8980 kg/m^3 ($8,9 \text{ gr/cm}^3$) y su dureza en la escala de Mosh es 4. [1]

3.1.2 Propiedades Atómicas.

Masa atómica	58,71 u
Radio medio	135 pm
Radio atómico calculado	149 pm
Radio covalente	121 pm
Radio de Van der Waals	163 pm
Configuración electrónica	[Ar]3d84s2
Estados de oxidación (óxido)	+3, +2, 0 (levemente básico)
Estructura cristalina	Cúbica centrada en las caras

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%ADquel>

3.1.3 Propiedades Físicas y Químicas.

Estado de la materia	Sólido (ferromagnético)
Color, Brillo	Blanco plateado, Metálico
Punto de fusión	1453 °C
Punto de ebullición	2730 °C
Entalpía de vaporización	370,4 kJ/mol
Entalpía de fusión	17,47 kJ/mol
Presión de vapor	237 Pa a 1726 K
Velocidad del sonido	4970 m/s a 293,15 K

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%ADquel>

Las principales propiedades químicas del Níquel son:

- Aparece bajo cinco formas isotópicas.
- Posee baja actividad química.
- Es soluble en ácido nítrico diluido y pasivo en ácido nítrico concentrado.
- Es resistente a cierto tipo de químicos reductores y es excelente su resistencia en presencia de álcalis ácidos.
- Es resistente a la corrosión, por tal motivo es utilizado para mantener la pureza del producto en la industria de alimentos y de fibras sintéticas.
- Comercialmente puro tiene alta conductividad eléctrica.
- Posee una alta temperatura de Curie y buenas resistencia a los campos magnéticos.
- Es un relativamente alto conductor térmico, por lo que se emplea en intercambiadores de calor.

3.1.4 Aplicaciones. Aproximadamente el 65% del níquel consumido se emplea en la fabricación de acero inoxidable austenítico y otro 12% en superaleaciones de níquel. El restante 23% se reparte entre otras aleaciones, baterías recargables, catálisis, acuñación de moneda, recubrimientos metálicos y fundición:

- Alnico, aleación para imanes.
- El mu-metal se usa para apantallar campos magnéticos por su elevada permeabilidad magnética.
- Las aleaciones níquel-cobre (monel) son muy resistentes a la corrosión, utilizándose en motores marinos e industria química.
- La aleación níquel-titanio (nitinol-55) presenta el fenómeno de memoria de forma y se usa en robótica, también existen aleaciones que presentan superplasticidad.

- Crisoles de laboratorios químicos.
- Níquel Raney: catalizador de la hidrogenación de aceites vegetales.¹

3.1.5 Información Geoquímica. La génesis de los depósitos niquelíferos puede ser explicada por procesos naturales como lo son:

1. La liquación, mecanismo proveniente de la diferenciación magmática, la cual no es más que una forma de segregación debido a la inmiscibilidad de los líquidos.
2. Procesos metamórficos, los cuales pueden originar depósitos diseminados de Ni en diques de rocas ultramáficas.
3. Formación de depósitos residuales originando lateritas niquelíferas.

Los depósitos residuales se originan por la acción de un clima tropical intenso sobre rocas que poseen cantidades trazas de Ni, tales como la peridotita, serpentinita, que poseen alrededor de 0,25% de Ni.

Durante la laterización de dichas rocas, el níquel temporalmente se va en solución, pero generalmente, es rápidamente reprecipitado junto con los minerales de óxido de hierro en la laterita, garnierita u otros filosilicatos niquelíferos.

El níquel es encontrado principalmente en tres tipos de depósitos: (a) Depósitos de sulfuro de níquel; (b) Lavas fluidas komatíticas y (c) Lateritas Niquelíferas.²

1 Wikipedia. Enciclopedia libre. <http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%ADquel>

2 BATEMAN, Alan. Yacimientos minerales de rendimiento económico. Barcelona, España. Ediciones Omega.

3.2 BENEFICIO DE MINERALES

Los procesos de obtención de metales a partir de recursos minerales, tienen un punto de partida común a través del descubrimiento del yacimiento ó fuente mineral. Dependiendo del tipo de mineral presente en el depósito, el valor comercial se relaciona con la concentración inicial del mineral; sin embargo no todos los minerales presentes en el depósito después de realizados los procesos de minado, tienen un valor comercial inmediato. Para tal efecto, el mineral explotado debe ser sometido a un proceso posterior, que incremente su potencial económico.

El procesamiento de los minerales después de las operaciones de minería se conoce como beneficio de minerales. Este proceso específico busca preparar de manera adecuada el mineral previamente explotado y utilizado como materia prima en procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos posteriores de obtención de metales como lo son la fundición, refinación y lixiviación. Con este proceso, los elementos indeseados presentes en el mineral, son removidos y algunas características físicas del mineral (granulometría, contenido de humedad) son alteradas a favor de las especificaciones propias de una planta de procesamiento mineral.

El beneficio de minerales comprende ciertos tipos de subprocesos denominados Operaciones Unitarias, con las cuales el mineral a procesar alcanza su principal objetivo: la separación y concentración del mineral ó metal valioso del resto del material ó ganga. Esta concentración expresa la cantidad en gramos del metal a explotar contenidos en una tonelada de mineral. Las principales operaciones unitarias realizadas sobre el cuerpo mineral en una planta de proceso son: Trituración, Clasificación ó Tamizado, Concentración y Deshidratación.

3.2.1 Trituración. Es la primera etapa de las operaciones de procesamiento del mineral, en la cual se logra la liberación parcial del mineral a explotar del material de desecho o ganga, reduciendo la granulometría inicial del material. La etapa de trituración permite incrementar el contenido mineral o ley a medida que este es conducido a las etapas posteriores de concentración, obteniendo concentrados de más alta pureza. La trituración se divide en dos etapas, primaria y secundaria.

- **Trituración Primaria:** Operación unitaria en la cual el material grueso es reducido hasta una granulometría no muy fina, por medio de trituradoras ó chancadoras que puede ser de mandíbulas ó giratorias. Las trituradoras de conos ó de rodillos reducen el tamaño de las partículas aun más pero sin ser todavía lo suficientemente finas para los procesos posteriores.

3.2.2 Clasificación o Tamizado. El tamizado es un método de separación de partículas basado exclusivamente en el tamaño de las mismas. En el tamizado industrial los sólidos se sitúan sobre la superficie del tamiz (malla), los de menor tamaño, o finos, pasan a través del tamiz, mientras que los de mayor tamaño, o colas, quedan retenidos. El material más utilizado para su fabricación son acero al carbono y el acero inoxidable.

3.2.3 Concentración. Es la etapa de procesamiento del mineral más importante y en ella se separa el mineral o metal valioso de la ganga. Ésta última constituye el primer flujo de rechazo. La operación unitaria de concentración normalmente se realiza en varias etapas dentro de un mismo circuito de concentración, debido a la mezcla de minerales con potenciales económicos atractivos.

La disposición de cada etapa de concentración depende de las propiedades fisicoquímicas del mineral y de la prioridad de obtención del metal.

Los principales métodos de concentración son:

- Separación por gravedad: Su principio se basa en la diferencia de gravedad específica entre los minerales a separar.
- Separación magnética: Separación de minerales por diferencia de conductividad eléctrica en presencia de un campo magnético.
- Separación electrostática: Separación de minerales por diferencia de conductividad eléctrica en presencia de un campo eléctrico.

Algunas de las recomendaciones, para el manejo de los productos residuales obtenidos al final de la operación unitaria de concentración son:

- Utilizar sistemas de captación de derrames líquidos y de dirección del efluente al sistema de eliminación de residuos.
- Evitar y/o controlar el uso de reactivos dañinos para el medio ambiente y reemplazar estos por algunos compuestos más benignos para reducir el impacto ambiental.
- Contar con equipos adecuados para el tratamiento de residuos líquidos tóxicos, como lo son: tanques de retención y tubería especial.

3.2.4 Deshidratación. Por lo general, los concentrados finales contienen cierta cantidad de agua indeseable en los procesos posteriores, estando presente en forma de suspensión líquida; es allí donde la operación unitaria de deshidratación entra a formar parte de la cadena de proceso. La deshidratación es la eliminación parcial de gran parte del agua retenida durante el proceso de concentración y es realizada al concentrado utilizando dos procesos: espesamiento y filtración.

El espesamiento, es el proceso de sedimentación sólida de la suspensión diluida, realizada en tanques de sedimentación, en los cuales se elimina el agua en exceso una vez el mineral es completamente asentado. Algunos flocculantes ayudan a las partículas más finas y ligeras a asentarse con una mayor rapidez. A medida que el exceso de agua es eliminado, la suspensión diluida se convierte en una pulpa espesa, la cual por medio de equipos de filtración, con o sin aire a presión, extraen la mayor cantidad de agua posible de la pulpa, la cual se denomina torta, una vez finalizada la operación unitaria de filtración.

3.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS

Las partículas sólidas se caracterizan por su forma, tamaño y densidad. Cuando un sólido homogéneo es dividido en varias partículas, la densidad de éstas son iguales a las del sólido original; mientras que si un material heterogéneo, como una mena metálica, es subdividido en varias partículas por procesos de reducción de tamaños, las densidades de las partículas son variables entre sí y diferentes a las del sólido original.

La forma de las partículas sólidas, son expresadas en función de geometrías específicas, como la esfericidad, la cual es independiente del tamaño de la partícula.

El tamaño de las partículas se relaciona con el diámetro para una partícula equidimensional. Para partículas que no son equidimensionales (que poseen una longitud mayor en una dirección en comparación con la otra) se caracterizan por la segunda dimensión de mayor longitud. El tamaño de las partículas sólidas es expresado de diversas formas o unidades, en función del intervalo de tamaños en

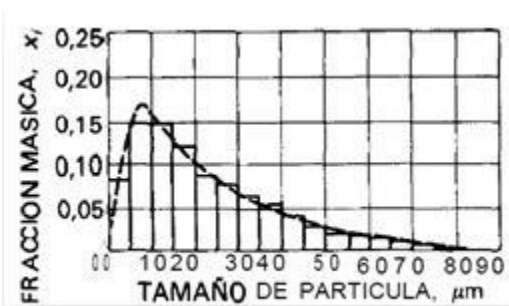
que se encuentre; así para el caso de partículas gruesas, el tamaño se expresa en pulgadas o milímetros, mientras para partículas finas se expresan en función de la abertura de los tamices en mallas y para las partículas extra finas, su tamaño es expresado en micrómetros o nanómetros.

3.3.1 Análisis Diferencial y Acumulativo del Tamaño de Partículas.

Consiste en el análisis tabulado de la información de tamaños de las partículas y presentado en forma de histogramas, expresado como la fracción de tamaños o número en cada incremento de tamaño en función del tamaño medio de las partículas ó del intervalo de tamaños.

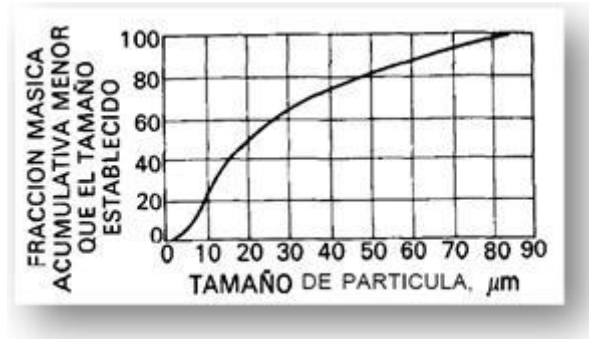
La curva continua de la línea de trazos en el histograma de la figura 2, representa la distribución aproximada de tamaños por fracción másica. Mientras la línea continua en la curva de la figura 3, representa el análisis acumulativo de la distribución de tamaños de la figura 2. Este análisis acumulativo es obtenido sumando continuamente los incrementos individuales de la distribución de tamaños, partiendo de las partículas más pequeñas a las más gruesas.

Figura 2. Análisis Diferencial de Distribución de Tamaños



Fuente: McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química

Figura 3. Análisis Acumulativo de Distribución de Tamaños



Fuente: McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química

3.3.2 Análisis por Tamizado. Es un método estandarizado para determinar el tamaño o distribución de tamaños de partículas, por medio de una serie de tamices elaborados en tela de alambre, los cuales tienen unas aberturas cuadradas y son identificados por el número de mallas en una pulgada. Con este método se analizan partículas comprendidas entre 3 y 0,0015 pulg (76 mm y 38 µm) de tamaño.

La serie de tamices más utilizada es la Tyler, que se basa en una abertura de 200 mallas, establecida en 0,074 mm. La abertura real de cada tamiz, es menor a la indicada pues no se tiene en cuenta el espesor del alambre utilizado. El área de las aberturas de cada tamiz es el doble del tamiz anterior más pequeño y cuya relación de dimensiones es por lo tanto $\sqrt{2} = 1,41$.

El análisis se realiza sobreponiendo la serie de tamices estandarizados Tyler verticalmente, partiendo del tamiz más pequeño al más grande, en el cual se deposita la muestra a analizar. El conjunto en montado a un sistema mecánico de sacudidas, por un tiempo de 10 minutos por cada tamiz. Una vez finalizado este

tiempo, el material retenido en cada tamiz y el material pasante del tamiz más fino (fondo), es pesado individualmente para poder determinar las fracciones retenidas y pasantes.

Los datos obtenidos son tabulados para obtener la distribución de tamaños tanto diferencial como acumulativa del material analizado, mostrando la fracción másica del incremento sobre cada tamiz en función del intervalo del tamaño de mallas del incremento.

En la tabla 1, se muestran los resultados de un análisis por tamizado típico encontrado en la literatura. En ella se observa los tamices utilizados identificados por el número de mallas, la abertura de cada tamiz que representa el diámetro de las partículas, la fracción másica retenida en cada tamiz, el diámetro medio de las partículas en cada incremento y la fracción acumulativa inferior o pasante de cada tamiz. En la figura 4, se muestra una curva típica de distribución granulométrica obtenida por el análisis de tamizado, en base a los valores mostrados en la tabla 1.

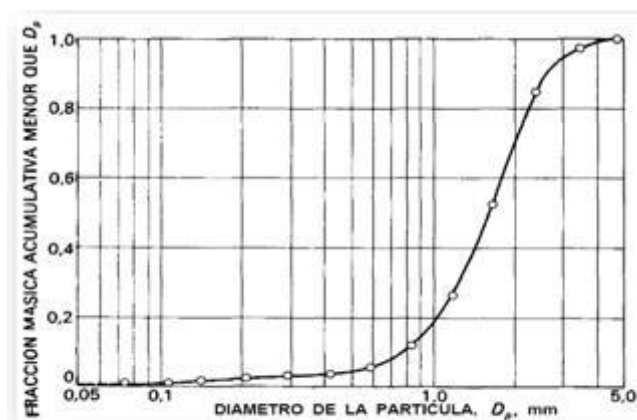
Tabla 1. Resultados Obtenidos del Análisis de Tamizado

Mallas	Abertura del tamiz, Dpi, mm	Fracción másica retenida, Xi	Diámetro medio de las partículas en el incremento Dpi, mm	Fracción acumulativa inferior a Dpi
4	4,699	0,0000	----	1,0000
6	3,321	0,0251	4,013	0,9749
8	2,362	0,1250	2,845	0,8499
10	1,651	0,3207	2,007	0,5292
14	1,168	0,2570	1,409	0,2722
20	0,833	0,1590	1,001	0,1132
28	0,589	0,0538	0,711	0,0594

35	0,417	0,0210	0,503	0,0384
48	0,295	0,0102	0,356	0,0282
65	0,208	0,0077	0,252	0,0205
100	0,147	0,0058	0,178	0,0147
150	0,104	0,0041	0,126	0,0106
200	0,074	0,0031	0,089	0,0075
Bandeja	---	0,0075	0,037	0,0000

Fuente: McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química

Figura 4. Análisis Acumulativo por el Método de Tamizado



Fuente: McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química

3.4 TRITURACIÓN Y MOLIENDA

La reducción de tamaños, es un término aplicable a aquellas operaciones unitarias en las cuales, las partículas sólidas, por corte o rompimiento son transformadas en piezas más pequeñas.

Los equipos de reducción de tamaños, utilizan principalmente fuerzas de compresión, corte, frotación o rozamiento e impacto para lograr llevar el mineral a una granulometría más fina. Los equipos de reducción de tamaño que actúan bajo fuerzas de compresión e impacto, generan sólidos gruesos, medios y finos en menor cantidad; pero si actúan bajo fuerzas de frotación o rozamiento, se obtienen sólidos muy finos. Los equipos bajo fuerzas de corte, originan sólidos de tamaños y forma específicos, con muy poca o casi nula generación de finos.

En la reducción de tamaños o desintegración mecánica, los equipos, para obtener una operación ideal, deben tener una gran capacidad, consumir el mínimo de energía y producir sólidos de tamaños específicos; sin embargo la diferencia en la granulometría alimentada a cada equipo hace casi imposible el obtener productos con las especificaciones requeridas. Estas características de los equipos, sirven para evaluar el comportamiento de los equipos por medio de la comparación entre la operación ideal y la operación real.

3.4.1 Características de los Productos Triturados. Las principales características de los productos obtenidos después de un proceso de trituración o molienda, son el aumento en el área superficial de las partículas al incrementar el número de partículas obtenidas, con una forma y tamaño definido. Estas características son obtenidas cuando existe una homogeneidad en la alimentación (tamaño, estructura física y química), pero debido a la heterogeneidad en la alimentación de los procesos reales, se obtiene una mezcla de partículas de tamaño variable. La diferencia de tamaño de las partículas obtenidas en los procesos reales es del orden de 10^4 .

Las partículas sometidas a trituración (excepto las partículas sometidas a procesos abrasivos), exhiben una apariencia de poliedros, de caras planas y con

bordes y picos escarpados. Pueden ser compactas o en forma de laminas o agujas y de dimensiones muy similares.

3.4.2 Requerimientos Energéticos. Durante los procesos de reducción de tamaños, las partículas alimentadas son distorsionadas y forzadas, almacenando temporalmente en su interior energía mecánica de tensión. El rompimiento de las partículas ocurre al aplicar una fuerza adicional que origina una distorsión que eleva su energía de tensión sobrepasando su resistencia final, ocasionando un rompimiento brusco en varios fragmentos que a su vez da origen a nuevas superficies.

La creación de nuevas superficies requiere una cantidad de trabajo suministrado por la liberación de energía de tensión, al momento de ocurrir la desfragmentación de la partícula.

3.4.3 Eficiencia de la desintegración. Se define como la relación entre la energía superficial creada por la desintegración mecánica y la energía absorbida por el sólido. La energía absorbida por unidad de masa del material W_n es:

$$W_n = \frac{e_s (A_{wb} - A_{wa})}{\eta_c}$$

Donde, η_c es la eficiencia de la desintegración, e_s es la energía superficial por unidad de área expresada en pies por libra fuerza por pie cuadrado y A_{wb} y A_{wa} son las áreas por unidad de masa de producto y alimentación respectivamente.

La energía superficial creada en el momento de la fractura es pequeña en comparación con la energía mecánica almacenada en la partícula al momento de la fractura, la cual es transformada en energía calórica; por tal motivo las eficiencias de las trituraciones son bajas.

La energía absorbida por el sólido, es menor que la energía transmitida por la maquina, debido a las perdidas energéticas generadas por fuerzas de fricción entre los componentes de las maquinas como lo son los cojinetes y otras partes móviles. La relación entre la energía absorbida y la eficiencia mecánica n_m es:

$$W = \frac{Wn}{n_m} = \frac{e_s (A_{wb} - A_{wa})}{n_m n_c}$$

La potencia consumida por el equipo a una rata de alimentación \dot{m} , es:

$$P = W\dot{m} = \frac{\dot{m}e_s (A_{wb} - A_{wa})}{n_m n_c}$$

3.4.4 Ley de Bond e Índice de Bond. Bond en 1952, propuso un método para el cálculo de la energía necesaria en la trituración y molienda de minerales, donde el trabajo que se requiere para formar partículas de tamaño D_p , a partir de una gran alimentación, es proporcional a la raíz cuadrada de la relación de superficie a volumen del producto S_p/V_p , luego:

$$\frac{P}{\dot{m}} = \frac{K_b}{\sqrt{D_p}}$$

Donde, K_b es una constante que depende del tipo de equipo y del material que se tritura. Para utilizar la ecuación anterior, se define el índice de trabajo de Bond, W_i , como la energía total, en KW/h por 200Lb de alimentación, que se necesita para reducir una alimentación muy grande hasta que un 80 por 100 del producto pase por un tamiz de 100 μ m. Si D_p esta dado en milímetros, P en kilovatios y \dot{m} en toneladas (200Lb) por hora, entonces K_b sera:

$$K_b = \sqrt{100 \times 10^{-3} W_i} = 0,3162 W_i$$

Si el 80 por 100 de la alimentación pasa por un tamaño de malla de D_{pa} mm y el 80 por 100 del producto pasa por un tamaño de malla de D_{pb} mm, entonces:

$$\frac{P}{\dot{m}} = 0,3162 W_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_{pb}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}} \right)$$

Luego el índice de Bond incluye la fricción en el triturador y la potencia bruta dada por la ecuación anterior. En la siguiente tabla se muestran algunos índices de Bond para cierto tipo de materiales. Estos datos son muy poco variables de una maquina a otra y se aplican tanto a trituración seca como moleinda humeda. En el caso de la molienda seca, el valor calculado de la potencia según al ecuación anterior, se multiplica por un factor de 4/3.³

3 McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química. Cuarta Edición. Editorial Mc Graw Hill.

3.5 EQUIPOS PARA LA REDUCCIÓN DE TAMAÑOS

Los principales equipos utilizados en las operaciones unitarias de reducción de tamaños son:

A. Trituradoras (gruesos y tinos).

1. Trituradoras de mandíbula.
2. Trituradoras giratorias.
3. Trituradoras de rodillos.

B. Molinos (intermedios y finos)

1. Molinos de martillos; impactores.
2. Molinos de rodadura-compresión.
 - a. Molinos de rulos.
 - b. Molinos de rodillos.
3. Molinos de frotación.
4. Molinos de volteo.
 - a. Molinos de barras
 - b. Molinos de bolas; molinos de guijarros.
 - c. Molinos de tubos; molinos de compartimentos.

Tabla 2. Índices de trabajo para trituración seca o molienda húmeda de algunos materiales

Material	Densidad Relativa	Índice de Trabajo, W_i
Bauxita	2,20	8,78
Clinker de Cemento	3,15	13,45
Materias Primas de Cemento	2,67	10,51

Arcilla	2,51	6,30
Carbón	1,4	13,00
Coque	1,31	15,13
Granito	2,66	15,13
Grava	2,66	16,06
Yeso	2,69	6,73
Hematitas	3,53	12,84
Piedra Caliza	2,66	12,74
Cuarzo	2,65	13,57

Fuente: McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química.

Las trituradoras, funcionan por acción de fuerzas compresivas, los molinos por acción de fuerzas de impacto y frotación; mientras las fuerzas de corte son características de las maquinas cortadoras. A continuación se describen los principales equipos utilizados en los procesos de reducción de tamaños.

3.5.1 Trituradoras. Son equipos utilizados en la reducción primaria de sólidos gruesos, operan a abaja velocidad y tienen gran capacidad. Se distinguen dos tipos principalmente, los quebrantadores de rodillos lisos y los dentados. Los primeros operan bajo fuerzas de compresión y son utilizados para romper grandes trozos de material duro, este proceso se denomina reducción primaria y secundaria de rocas y minerales. Los dentados fragmentan y separan el material alimentado por lo general material blando como carbón, huesos y pizarras.

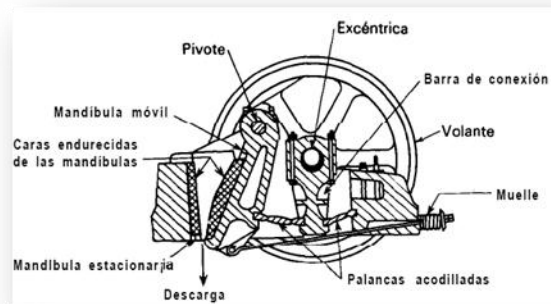
3.5.1.1 Trituradoras de Mandíbulas. Son equipos que constan de dos mandíbulas en forma de V, abiertas en la parte superior donde el material es

alimentado y donde en la parte inferior se descarga al material triturado. Una de las mandíbulas es fija y se sitúa casi verticalmente, denominada yunque; mientras la otra es móvil y está situada a un ángulo de 20 a 30° con la vertical denominada oscilante.

Esta mandíbula móvil es accionada por medio de una excéntrica que induce, por su recorrido horizontal, fuerzas de compresión al material situado en medio de las mandíbulas. Los trozos de material grandes son triturados en la parte superior de las mandíbulas y a medida que descienden son triturados a un tamaño más pequeño limitado por la abertura o luz entre las mandíbulas. La frecuencia de oscilación de las mandíbulas es de 250 a 400 veces por minuto.

Maquinas con aberturas de 72x96 pulg (1,8x2,4 m), aceptan rocas de 6 pies (1,8 m) de diámetro y tienen una producción de 1000 toneladas por hora, hasta un tamaño máximo del producto de 10 pulg (250 mm). Las trituradoras secundarias reducen las partículas previamente trituradas hasta ¼ a 2 pulg (6 a 50 mm). En la figura 5, se muestra el tipo más común de trituradoras de mandíbulas: el triturador de Blake.

Figura 5. Tritrador de Mandíbulas de Blake

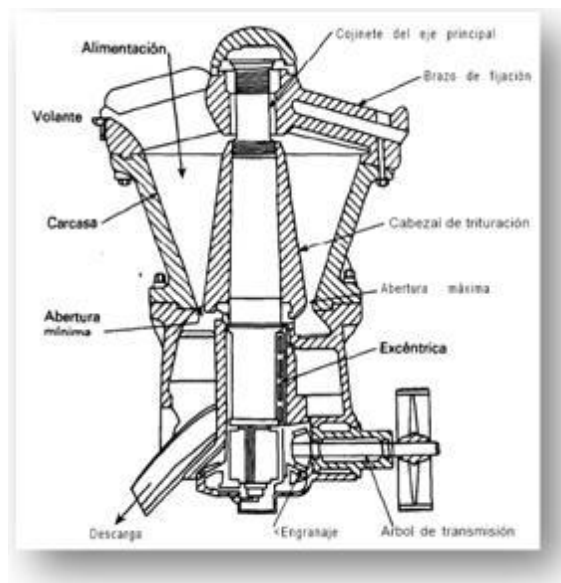


Fuente: McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química.

3.5.1.2 Trituradoras Giratorias. Es una trituradora de mandíbulas troncocónicas donde el material es triturado en algún punto en todo momento. Un cabezal cónico de trituración, acoplado a un eje pivotado en la parte superior, gira dentro de una carcasa en forma de embudo, abierto en la parte superior, donde se alimenta el material a triturar, haciendo que el cabezal se desplace hacia adentro y hacia fuera de la pared estacionaria. Los sólidos son triturados al depositarse dentro del espacio en forma de V entre la carcasa y el cabezal cónico de trituración.

Las velocidades normalmente oscilan entre 124 a 425 revoluciones por minuto y sus descargas son continuas. Consumen menos energía por tonelada procesada y su producción puede alcanzar las 3500 toneladas por hora. En la figura 6, se observa una trituradora de tipo giratorio.

Figura 6. Trituradora Giratoria

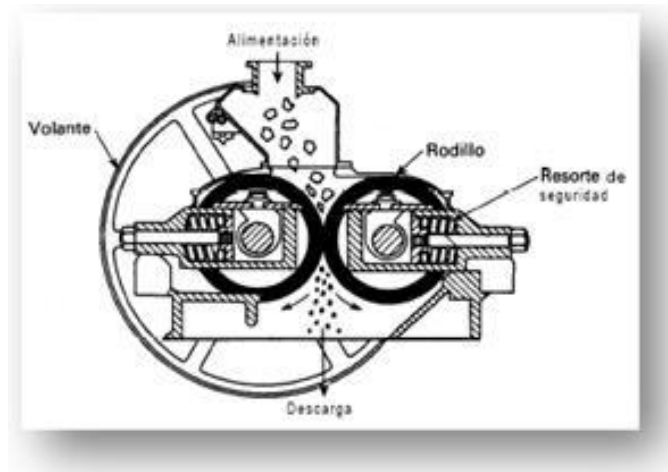


Fuente: McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química.

3.5.1.3 Trituradora de Rodillos Lisos. Equipo de reducción de tamaños, que basa su funcionamiento en dos rodillos metálicos de superficies lisas (elementos activos) que giran sobre dos ejes paralelos horizontales uno hacia el otro con la misma velocidad de rotación, en los cuales el mineral alimentado queda atrapado en el espacio estrecho de separación, ocasionando el rompimiento del mineral por la acción de fuerzas compresivas. El mineral que es triturado cae por la parte inferior del equipo.

Los rodillos van desde 24 pulg (600 mm) de diámetro y 12 pulg (300 mm) hasta 78 pulg (2000 mm) de diámetro y 36 pulg (914 mm) de longitud. El giro de los rodillos se encuentra en el intervalo de 50 a 300 rpm. Estas trituradoras son de tipo secundarios con tamaños de alimentación entre $\frac{1}{2}$ y 3 pulg (12 a 75 mm) y de productos triturados entre $\frac{1}{2}$ pulg (12 mm) y aproximadamente 20 mallas. En la figura 7, se observa una trituradora de rodillos lisos.

Figura 7. Trituradora de Rodillos Lisos



Fuente: McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química.

3.5.1.4 Trituradoras de Rodillos Dentados. Son trituradoras de rodillos en los cuales existe en la superficie de contacto de los rodillos, diferentes texturas como rugosidades, barras trituradoras o dientes. Este tipo de quebrantadores puede ser de dos rodillos o de un solo rodillo que funciona frente a una placa curvada fija. Las trituradoras de rodillos dentados son más versátiles que los de rodillos lisos, debido a la gran variedad de accesorios que se encuentran en la superficie de los rodillos como dientes, discos, barras, etc. Sin embargo este tipo de trituradoras está limitado por el uso de materiales muy duros.

Este tipo de trituradora, opera bajo fuerzas de compresión, impacto y cizalla. Son utilizados para la reducción primaria del carbón y materiales similares, en el caso de los de doble rodillo dentado y su tamaño de alimentación puede ser de hasta 20 pulg (500mm) y su producción de 500 toneladas por hora.

3.5.2 Molinos. La molienda es la operación unitaria posterior al proceso de trituración, en la cual, el producto del material triturado en el quebrantador, es alimentado a un molino para reducir su tamaño a un rango de finos o polvos. En esta operación unitaria se acondiciona el material para la etapa de concentración, ajustando su granulometría y propiedades superficiales.

Los molinos son cilindros rotatorios, reforzados en su interior con material de alta resistencia mecánica, los cuales son cargados en una fracción de su volumen con mineral en vía húmeda (pulpas de 50 a 80% de humedad) y seca (7% de humedad máx.).

Los molinos pueden ser autógenos, cuando el medio de molienda para la reducción de tamaño corresponde a partículas más gruesas del mismo material de la misma mena y semi autógenos, cuando se agregan medios moledores

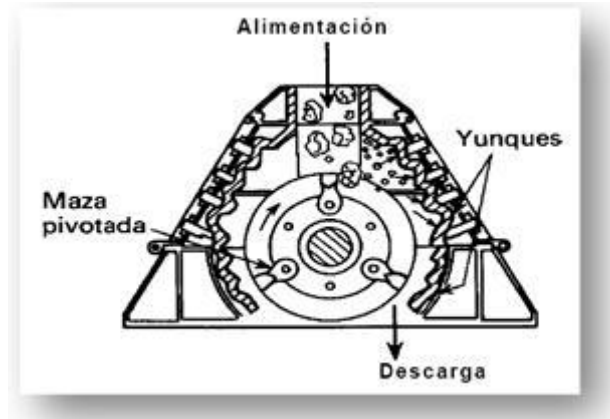
diferentes al mismo material como lo son las barras y bolas metálicas; así como el uso de guijarros.

3.5.2.1 Molinos de Martillos e Impactores. El molino de martillos, consiste de una carcasa cilíndrica que gira por medio de un rotor a una velocidad elevada sobre un eje horizontal. Las partículas son golpeadas fuertemente por una serie de martillos giratorios acoplados sobre uno o varios discos rotores. El mineral es alimentado por la parte superior de la carcasa, dentro del molino es golpeado por los martillos ocasionando un rompimiento y coque de las partículas contra la pared del cilindro en repetidas ocasiones, hasta obtener un producto pulverizado que es recogido en un agujero situado en la parte inferior de la carcasa.

Cada disco rotor, de 6 a 18 pulg (150 a 450 mm) de diámetro, consta de cuatro a ocho martillos. Los martillos son barras metálicas que en sus extremos pueden ser planos, alargados o bien afilados para crear un borde cortante. El tamaño de las partículas, cuando son de molienda intermedia, son de 1 pulg (25mm) a 20 mallas. Para una molienda fina, la velocidad periférica de los extremos de los martillos alcanza los 22000 pies/min (112 m/s) y pueden ser alimentados de 0,1 a 15 toneladas/h y tamaños menores a 20 mallas.

En la figura 8, se muestra un impactor, equipo similar al molido de martillos para servicio pesado, con la diferencia que no contiene rejilla o tamiz. Las partículas son fragmentadas por fuerzas de impacto, sin presentar la pulverización característica de los molinos de martillos.

Figura 8. Impactor (similar al molino de martillos)

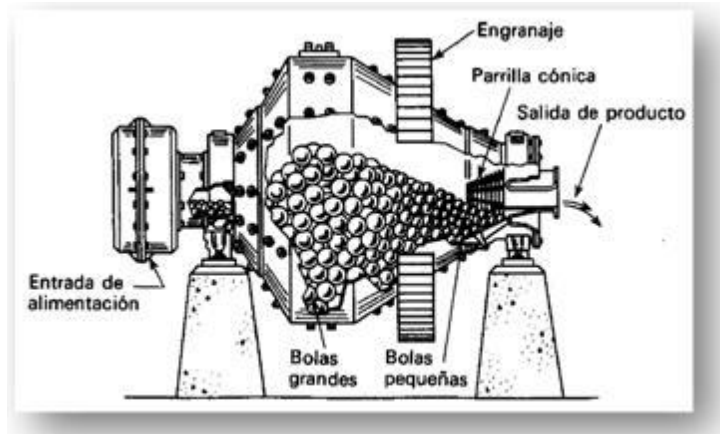


Fuente: McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química.

3.5.3 Molinos de Volteo. Consiste en una carcasa cilíndrica, generalmente de acero y recubierta con láminas de acero de elevado carbono, porcelana o caucho, que contiene medios sólidos de molienda hasta ocupar la mitad de su volumen, la cual por medio de un rotor, gira a bajas velocidades alrededor de un eje horizontal.

Los medios molturantes son barras metálicas, cadenas, bolas de metal, caucho, madera, guijarros, esferas de porcelana, etc. Los molinos de volteo son inadecuados para obtener material fino y para reducciones intermedias. En la figura 9 se muestra un molino de volteo que utiliza como material moledor bolas metálicas.

Figura 9. Molino de Volteo



Fuente: McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química.

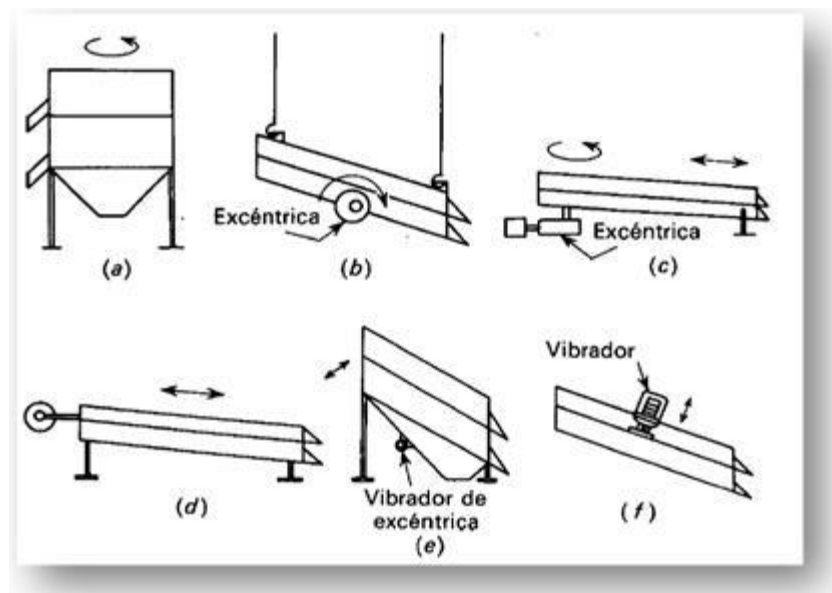
En los molinos de volteo, se utiliza la energía consumida en elevar los medios molidores para reducir el tamaño de las partículas debido al impacto contra el material.

En un molino de barras, éstas son generalmente de acero y su diámetro oscila entre 1 a 5 pulg (25 a 125 mm). Son utilizados para la reducción intermedia. En un molino de bolas o de guijarros, la mayor parte de la reducción se produce por impacto de las bolas o guijarros al caer desde la parte más alta de la carcasa. La carcasa para un molino de bolas grande, la carcasa puede tener 10 pies (3 m) de diámetro y 14 pies (4,25 m) de longitud. El diámetro de las bolas es de 1 a 5 pulg (25 a 125 mm) y los guijarros de 2 a 7 pulg (50 a 175 mm) de diámetro.

3.6 EQUIPOS DE TAMIZADO

La mayoría de tamices utilizados industrialmente, realizan la separación de las partículas por gravedad, sin embargo adicionalmente a la gravedad, algunos equipos realizan movimientos tales como: giros, agitación, vibración, sacudidas o fuerzan las partículas a pasar entre las aberturas por medio de cepillos o movimientos centrífugos. En la figura 10, se muestran algunos de los movimientos típicos de los tamices industriales.

Figura 10. Movimiento de los Tamices. (a) giro horizontal; (b) giro vertical; (c) giro en un extremo y sacudida en otro; (d) sacudida; (e) vibración mecánica y (f) vibración eléctrica.



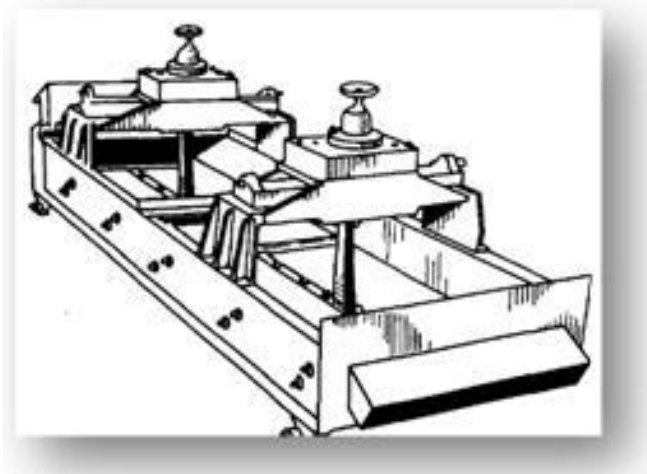
Fuente: McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química.

3.6.1 Tamices y Parrillas Estacionarias. Son barras metálicas paralelas, separadas de 2 a 8 pulg formando un enrejado, con un cierto ángulo de inclinación. El material viaja en la dirección de la longitud de las barras, desde la

parte superior hasta un colector depositado en la parte inferior. Las barras tienen una anchura mayor en el extremo más alto y menor en la parte inferior para evitar atascamientos.

3.6.2 Tamices Vibratorios. Son tamices que vibran con rapidez y poca amplitud para evitar su obstrucción. La vibración puede ser tanto mecánica, por medio de excéntricas o eléctrica, por medio de grandes solenoides. Las vibraciones van desde 1800 a 3600 por minuto y pueden ser de 12 pulg de ancho por 24 pulg de longitud, con un consumo energético de 1/3CV. En la figura 11 se observa un tamiz de este tipo.

Figura 11. Tamiz Vibratorio



Fuente: McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química.

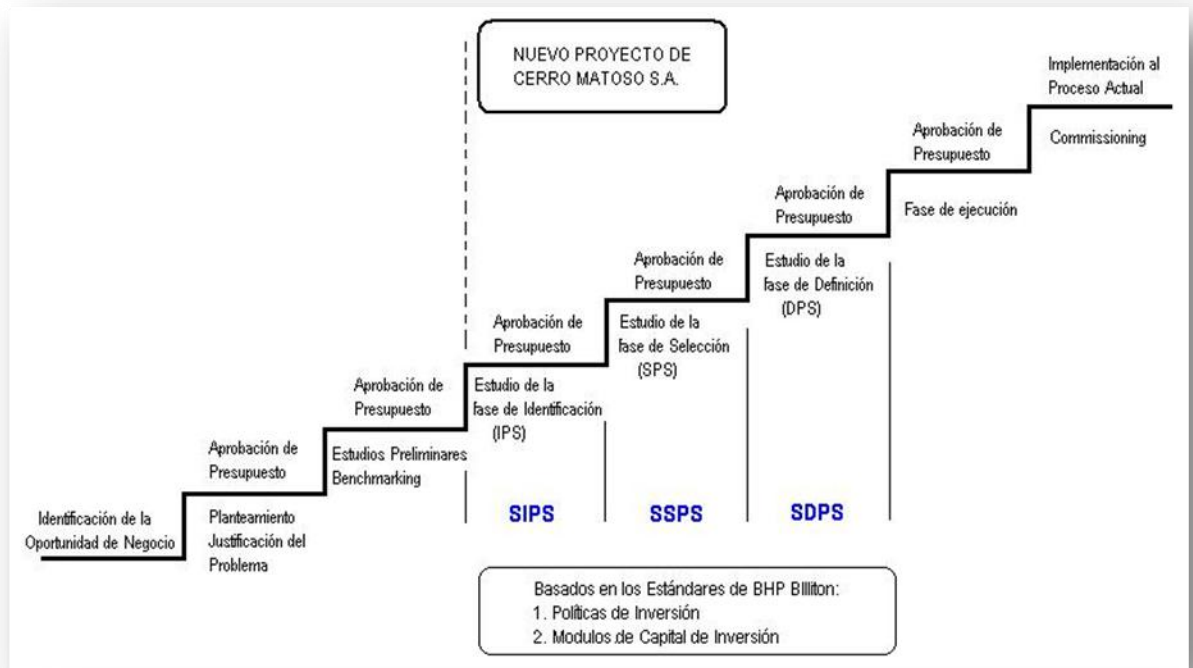
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La validación y evolución de nuevas oportunidades de mejoramiento dentro del proceso de producción actual de Ferroníquel en CMSA, enfocadas a la aprobación de nuevos posibles proyectos en vía de implementación, conlleva a cumplir una serie de etapas propias de la normatividad de la compañía, representadas por medio de sus estándares internacionales de inversión propuestos por BHP Billiton para el desarrollo de proyectos.

Cada estándar de capital y políticas de inversión propuestos por BHP Billiton, contiene una serie de requerimientos mínimos para que cada oportunidad de inversión ó proyecto, sea evaluada y aprobada por la alta gerencia de la compañía y su CSG (customer sector group), avanzando a etapas posteriores y logrando así, la implementación y ejecución del proyecto dentro del proceso actual de producción.

De una manera simple, la figura 12 representa las etapas básicas que debe cumplir un proyecto, desde su origen como oportunidad de negocio identificada, hasta su implementación dentro del diagrama de flujo actual en CMSA. Cada escalón representa un nivel de aprobación de presupuesto que permite el avance del proyecto, el cual es justificado por la aprobación de los requerimientos propios de cada nivel ó escalón, con base a los estándares de BHP Billiton. Las siglas: SIPS, SSPS y SDPS, representan los estándares de inversión para los estudios de las fases de Identificación, Selección y Definición, respectivamente.

Figura 12. Fases de Aprobación para Nuevos Proyectos en CMSA



Con base en lo anterior, la elaboración del reporte final de la fase de Identificación (fase inicial para el desarrollo de nuevas oportunidades de inversión) del proyecto Upgrading Fase II en CMSA, fue desarrollada de manera sistemática, bajo un cronograma de acción implementado por la unidad de negocios de Proyectos de Producción, el cual permitió ir ejecutando paso a paso los requerimientos mínimos consignados en los estándares de capital de inversión.

El desarrollo del cronograma implementado por la unidad de negocios, conto con una serie de etapas críticas para el desarrollo del proyecto, algunas de las cuales se encuentran descritas a continuación con el fin de lograr los objetivos propuestos en este informe.



4.1 FASE DE INDUCCIÓN

La fase de inducción fue proporcionada por la unidad de negocios de Recursos Humanos, donde por medio de una serie de videos, conferencias, entrevistas y demás medios interactivos, fueron proporcionadas las herramientas adecuadas para entender el proceso actual de producción de Ferroníquel, su planteamiento estratégico como organización, visión, misión, políticas internas, aspectos relacionados con la seguridad industrial, relaciones laborales, definición de unidades de negocios y demás conceptos necesarios para formar una idea global de que es Cerro Matoso S.A.

La introducción al proyecto Upgrading Fase II fue realizada por parte del tutor del proyecto y demás miembros de la unidad de negocios de Proyectos de Producción, quienes durante un periodo de 4 semanas, enfatizaron en la importancia de conocer en detalle: el proceso de producción, los diagramas de flujo de proceso, los equipos que intervienen en la operación, las variables operativas y de diseño de cada uno de los equipos, los aspectos geológicos del depósito mineral, las especificaciones de la materia prima alimentada al proceso y del producto final, los principales cuellos de botella de la operación entre otros.

Para tal fin, fueron necesarias reuniones de grupo internas de la unidad, reuniones de construcción de pilas que contaron con la participación de los gerentes de las unidades de negocios de Mina, Preparación de Minerales, RKEF, Refinería, Tecnología, Ingeniería y Proyectos de Producción, visitas a campo a cada unidad de negocio, revisión bibliográfica de documentos internos y la orientación permanente del personal de la unidad de negocios de Proyectos de Producción, compuesta por: Ing. José Agustín Duran Sánchez (Gerente), Ing. Víctor Darío



Meléndez Flores (Superintendente de Proyectos de Producción y tutor del proyecto) e Ing. Geólogo, Rodrigo Guzmán Arteaga (Superintendente).

4.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Como punto de partida, se realizó la fundamentación teórica de los conceptos relacionados con los procesos de producción de metales a partir de minerales por métodos pirometalúrgicos, enfocados a la producción de Níquel. En esta etapa, se analizó conceptos tales como: beneficio de minerales, características de las partículas sólidas, reducción de tamaños, equipos de reducción de tamaños y separación de partículas sólidas por tamizado.

Para entender, analizar y cuantificar de manera crítica la problemática enfrentada debido al panorama actual en CMSA, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva de todos aquellos documentos internos de cada unidad de negocios, principalmente de Mina y Preparación de Minerales, que permitieran determinar los posibles factores intrínsecos y extrínsecos de cada operación, propias de estas unidades de negocios y relacionadas directamente con el planteamiento del proyecto Upgrading Fase II.

Los principales documentos analizados corresponden a estudios internos sobre: la variación del grado de Níquel del depósito mineral, el incremento en el mineral enviado a stocks intermedios, la implementación de la fase de Upgrading I, pruebas de concentrabilidad del material de rechazo del Upgrading I, pruebas de concentrabilidad por tipos de rocas puras y mezclas de estas, etc.



El análisis de los documentos anteriores, demostró que la oportunidad de inversión propuesta por la unidad de negocios de Proyectos de Producción, bajo el proyecto Upgrading Fase II, es una opción válida para analizar en busca de solucionar la problemática actual.

4.3 ANÁLISIS DE ESTÁNDARES DE INVERSIÓN – BHP BILLITON

Una vez la oportunidad de negocio es consolidada como nuevo proyecto en CMSA, el avance del mismo está relacionado con la aprobación de un estudio o reporte final de la fase de Identificación, Selección y Definición, para las tres etapas posteriores respectivamente. Cada estudio debe contener los requerimientos mínimos consignados en los estándares de inversión de capital de cada fase e identificados por sus iniciales en inglés como: SIPS (Standard for a Identification Phase Study), SSPS (Standard for a Selection Phase Study) y SDPS (Standard for a Definition Phase Study).

Este trabajo de grado, presentado como parte de la práctica empresarial en la empresa Cerro Matoso S.A. (CMSA), tiene como objetivo general elaborar el documento final de la fase de Identificación del proyecto Upgrading Fase II, luego este reporte final debe contener los requerimientos mínimos del Estándar para un Estudio de Identificación (SIPS). Cada ítem que compone el SIPS será cubierto en el siguiente capítulo; sin embargo, una breve descripción de la norma será realizada a continuación.

4.3.1 Estándar para un Estudio de la Fase de Identificación (SIPS)

4.3.1.1 Definición del SIPS. El objetivo primario del Estudio de la Fase de Identificación, es demostrar que la oportunidad de inversión (nuevo proyecto) es lo suficientemente atractiva para justificar los costos de una investigación más detallada. Este estudio debe contener las posibles alternativas a ser evaluadas durante la siguiente fase de Selección.

4.3.1.2 Propósito del SIPS. Asegurar que el estudio de identificación continúe a la fase de selección, cumpliendo las recomendaciones citadas en este estándar:

- Cumplir los requerimientos mínimos para la definición y ejecución del capital de inversión de acuerdo a las políticas de inversión de BHPB.
- Proporcionar una justificación económica del proyecto para continuar a la fase de Selección.
- Describir las alternativas de implementación a ser evaluadas en las siguientes fases.
- Proporcionar un análisis de riesgos detallado de la oportunidad de inversión.
- Proporcionar en detalle, el alcance de trabajo, cronograma, plan de recursos y costos estimados de la fase de Selección.

4.3.1.3 Alcance del Estudio. Antes de proceder con la realización del Estudio de la Fase de Identificación, el alcance del estudio debe ser definido por el director/líder del proyecto y debe contener los siguientes entregables:

- Potencial de la nueva oportunidad de negocio
- Los rasgos generales de la oportunidad, incluyendo las alternativas de implementación a ser estudiadas en las siguientes fases.
- La magnitud de los costos estimados de las alternativas y cronograma de realización de las siguientes fases.
- Los tópicos técnicos necesarios para una mayor investigación.
- Los recursos y servicios requeridos por la oportunidad.
- Documentación de los riesgos significativos de la oportunidad de inversión tanto en la fase de Identificación como la de Selección.

4.3.1.4 Estudio de Identificación. El estudio de identificación consiste en un reporte o informe escrito, que contiene los requerimientos mínimos consignados en el estándar para la fase de Identificación, el cual funciona como una lista de control (checklist), donde el nivel de documentación proporcionado para cada ítem debe reflejar el nivel de riesgo de la oportunidad. Este reporte debe ser evaluado por parte de la alta gerencia de CMSA y del CSG (Customer Sector Group) que corresponde a SSM (Stainless Steel Materials).

4.4 PLANIFICACIÓN DE ACTIVIDADES

La documentación y redacción del estudio de Identificación del proyecto Upgrading Fase II, está relacionada directamente con los requerimientos mínimos consignados en la norma para cada ítem que la compone; algunos de estos, necesitan de la realización de diferentes actividades para poder ser explicados y documentados a plenitud. Las actividades programadas tienen entonces por

objeto cubrir varios aspectos o ítems que requieren ser explicados para facilitar la realización del documento.

Es por tal motivo que, a medida que se avanzó en el estudio del estándar de capital de inversión para la fase de Identificación, un cronograma de actividades fue realizado por parte de la unidad de negocios de Proyectos de Producción, el cual fue utilizado como base para la creación de los indicadores de desempeño del proyecto, que permitieron a la Vicepresidencia de Producción tener seguimiento al desarrollo y avance del proyecto según el cumplimiento del cronograma propuesto.

En la tabla 3, se muestra la metodología de trabajo adoptada por la unidad de negocios de Proyectos de Producción, en la cual se aprecian las actividades realizadas, tareas específicas dentro de cada actividad y el personal responsable por cada actividad. Las actividades ejecutadas y documentadas como parte de la metodología de trabajo propuesta para dar cumplimiento con el desarrollo de este proyecto, se explican en detalle en la siguiente sección.

Tabla 3. Metodología de Trabajo Propuesta

METODOLOGIA DE TRABAJO PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO UPGRADING II	
Actividad	Tareas específicas
Fase I. Validación conceptual del Upgrading	
Logística de preparación	Análisis de: Benchmarking, conceptos bibliográficos, recursos humanos y físicos.
Construcción de la planta piloto	Contrataciones de personal, consultores externos, presentación del layout.
Instalación de equipos	Disposición del sitio, bloqueos de seguridad, control de personal, monitoreo del proceso.
Prueba de equipos	Solicitud de recursos energéticos e hídricos, transporte de material, dirección de operaciones, control de pérdidas.

Ensayos en planta piloto	Transporte de personal, dirección y control del ensayo, supervisión, toma de muestras, análisis de muestras y reporte de resultados.
Fase II. Desarrollo del estudio de fase de Identificación	
Conclusiones y resultados	Análisis de resultados para cada tipo de muestra. Cálculo del % de Upgrading de cada muestra, conclusiones.
Ensayos externos	Pruebas de concentrabilidad en METSO, análisis químico de muestras
Escalamiento de equipos	Elaboración del diseño final de planta, dimensionamiento de equipos, definición de variables operativas.
Evaluación económica	Generación del modelo económico, análisis probabilísticos, estimación de costos de capital e inversión de las fases restantes.
Informe del estudio de identificación	Documentación de información, revisión bibliográfica, análisis de estándares claves, redacción del reporte, reuniones de revisión, presentación del proyecto.
Aprobación de los stakeholders	Presentación al comité directivo, sustentación del proyecto, revisión de entregables.

* Convenciones utilizadas* JDS (José Duran Sánchez- Gerente de la unidad de proyectos de producción) / VDM (Víctor Darío Meléndez – Superintendente de proyectos de producción) / RG (Rodrigo Guzmán – Superintendente de la unidad de negocios de proyectos de producción) / CMS (Cesar Mauricio Sánchez – Estudiante en práctica UIS)

4.5 EJECUCIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE ACTIVIDADES

De la metodología de trabajo propuesta por la unidad de negocios de proyectos de producción para el desarrollo del proyecto Upgrading Fase II, algunas de las actividades realizadas contaron con una participación directa por parte del autor de este proyecto de grado. Estas actividades fueron:

- Dirección, control y supervisión de los ensayos realizados en la planta piloto como parte de la validación conceptual del proyecto UGII.

- Análisis de los resultados obtenidos en planta piloto para cada tipo de muestra y serie de ensayos, cálculo de los respectivos porcentajes de Upgrading y conclusiones finales. Estas actividades fueron realizadas dentro del desarrollo del estudio de la fase de identificación.
- Elaboración y análisis del balance de masa global en la validación del diseño conceptual de la planta de concentración.
- Elaboración del estudio de identificación por medio de la documentación de información, revisión bibliográfica, análisis de los estándares claves y reuniones de trabajo para determinar las ventajas y desventajas de cada alternativa planteada con sus respectivos análisis de riesgos.

Cada actividad propuesta en la metodología de trabajo, contó con la planeación adecuada por parte de la unidad de negocios y en especial del responsable de turno, quien además era el responsable de la supervisión de la actividad, siendo estas realizadas por el personal encargado para cada labor.

Una vez ejecutada cada actividad, sus resultados, conclusiones, observaciones, recomendaciones y comentarios, eran documentados, utilizando los formatos para el registro de información internos de CMSA, para facilitar, a la hora de redactar el estudio final, la recopilación y selección de la información clave que cumplía con los estándares aplicados.

4.6 REDACCIÓN DEL ESTUDIO DE IDENTIFICACIÓN

La redacción del estudio de la fase de Identificación del proyecto Upgrading Fase II, se inició con la ejecución de la fase II de la metodología de trabajo propuesta y culminó con la totalidad de las actividades realizadas y documentadas. Una vez el



reporte final del estudio de Identificación fue culminado, se realizó una verificación del cumplimiento de los requerimientos mínimos aplicables. Algunos de los ítems que componen la norma, no fueron incluidos dentro del reporte final por tratarse de un proyecto de mejoramiento de un proceso existente que cumple con los estándares de capital de inversión de BHP Billiton.

5. DESCRIPCION DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

A continuación se hace una descripción de las actividades realizadas, como parte del desarrollo de este proyecto, de acuerdo con la metodología de trabajo propuesta para el desarrollo del proyecto Upgrading Fase II, descritas en la sección 4.4 de este informe.

5.1 ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS PARA EL PROYECTO UPGRADING FASE II

Las alternativas de proceso planteadas buscan maximizar el beneficio de los tipos de roca existentes en el depósito mineral, logrando el mejor provecho del proceso y de las facilidades actuales de la planta.

5.1.1 Proceso Actual. El proceso actual de producción de Ferroníquel en CMSA, se inicia con la explotación a cielo abierto del mineral proveniente de Mina, el cual es recolectado en una serie de patios organizados de acuerdo con su composición química. El frente de explotación en el depósito mineral se muestra en la figura 13.

Una clasificación inicial es realizada al material que compone cada patio. El material retenido en esta etapa, es triturado y enviado junto con el material clasificado a una zona de trituración en serie, por medio de bandas transportadoras, como las mostradas en la figura 14, donde se obtiene la granulometría óptima para ser alimentada al proceso.

Figura 13. Frente de Explotación Mina



Figura 14. Etapa de Trituración y Transporte del Mineral a Pilas



El material proveniente del proceso de trituración, es homogenizado y depositado en forma de dos pilas de alimentación, para cada línea de producción, por medio de un apilador móvil mostrado en la figura 15. Estas pilas de 150.000 toneladas cada una, son enviadas al proceso de secado por medio de un sistema de reclamadores. Para lograr la reducción del contenido de humedad en el mineral de pila, se disponen de dos hornos secadores rotatorios.

Una vez el mineral es secado (10% de humedad en promedio), se adicionan cantidades controladas de carbón mineral y finos recolectados en el proceso de

secado para ser enviado al proceso de calcinación. En esta etapa, ocurren los procesos de secado final, pre-reducción del mineral y calcinación por medio de dos hornos calcinadores rotatorios.

El mineral pre-reducido y calcinado, es conducido a la zona de fundición donde por medio de dos hornos de fusión de arco eléctrico, se logra la reducción y separación del metal líquido y la fase escoria. Este proceso se realiza en la unidad de negocios de RKEF, la cual se muestra en la figura 16. La escoria es conducida a un proceso de granulación para ser depositada en los cerros o botaderos de escoria, mostrados en la figura 17.

Figura 15. Funcionamiento del Apilador Móvil



Figura 16. Unidad de Negocios de RKEF (Rotary Kiln Electric Furnace)



Figura 17. Cerros o Botaderos de Escoria en CMSA



El metal líquido obtenido, es enviado a la etapa de refinación donde se realiza la reducción de impurezas y se obtiene el grado de refinación y pureza que cumple con la especificación propuesta por el cliente. Este proceso se realiza por medio

de un horno eléctrico de refinación utilizando una serie de reactivos controlados. La escoria obtenida en este proceso es enviada hacia la planta de recuperación de Ferroníquel donde se retorna hacia el proceso de fundición, chatarra y finos.

Como última fase del proceso de producción, se encuentra la zona de granulación, en donde el metal líquido refinado, es enfriado por medio de chorros de agua de alta presión y granulado para ser enviados a la Zona de Manejo de Producto Terminado, figura 18, donde el producto final es empacado en forma de bolsas para ser transportados vía terrestre hacia el Centro de Acopio ubicado en el puerto marítimo de Cartagena, donde se despacha el producto hacia los diferentes clientes, (Europa, Japón, Asia y Norte América).

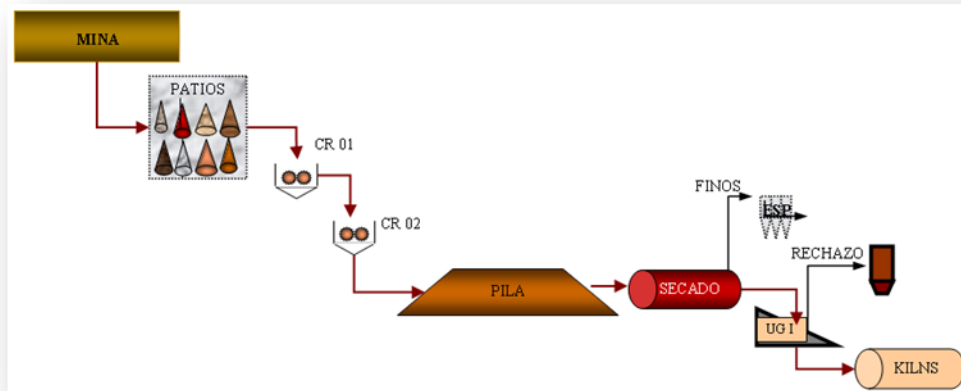
Figura 18. Zona de Manejo de Producto Terminado



El proceso actual de producción de Ferroníquel, desde Mina hasta Calcinadores, lugar donde será afectado el diagrama de flujo de proceso por la implementación

del proyecto Upgrading Fase II, se esquematiza en la figura 19. A partir del proceso de Construcción de Pila, el diagrama de proceso no sufrirá variaciones.

Figura 19. Diagrama de flujo del proceso actual de CMSA

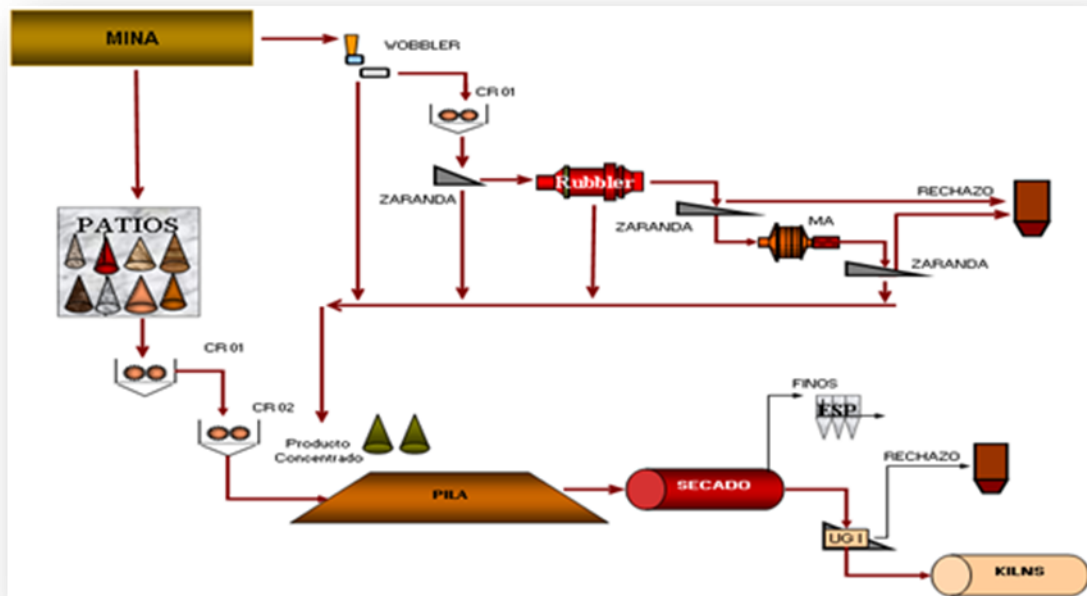


Fuente: Estudio de la Fase de Identificación - Upgrading Fase II. CMSA.

5.1.2 Alternativa I: Planta de concentración externa a la línea de proceso actual. La planta de concentración estaría ubicada entre las unidades de negocio de Mina y Preparación de Minerales. Se propone un diagrama de proceso paralelo a la línea actual de producción, en donde el producto concentrado entraría a formar parte de los patios o materia prima para el proceso de construcción de pilas. Con la implementación de esta alternativa, el diagrama de flujo actual del proceso no sufriría variaciones.

La planta de concentración propuesta estaría conformada por la siguiente línea de equipos: Woobler; Trituradora; Zaranda; Rubbler; Zaranda; Molino Autógeno y Zaranda. El diagrama de flujo propuesto se observa en la figura 20.

Figura 20. Diagrama de flujo propuesto para la alternativa I



Fuente: Estudio de la Fase de Identificación - Upgrading Fase II. CMSA.

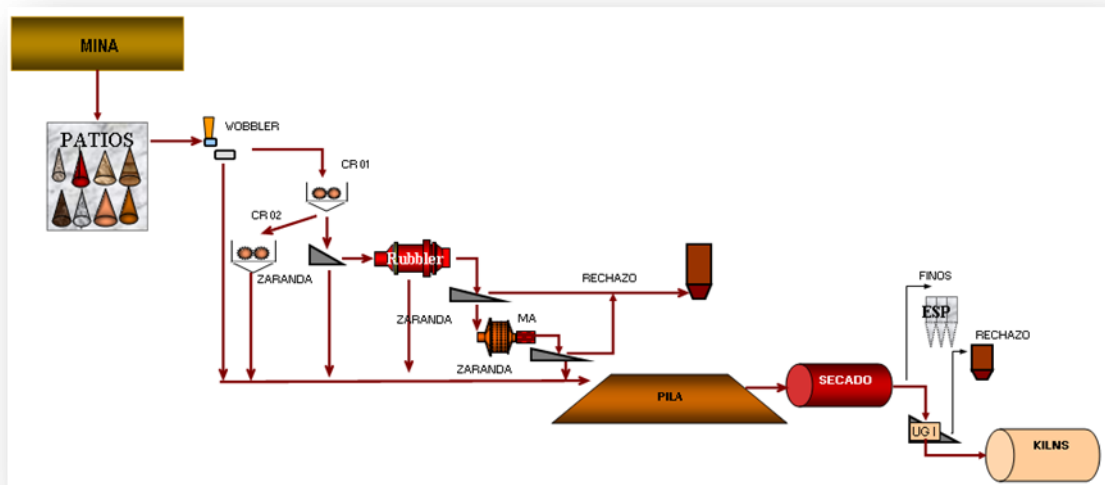
El mineral proveniente de mina que cumple con las especificaciones de concentrabilidad, material en stocks intermedios y material proveniente del rechazo del Upgrading fase I, serán los principales recursos beneficiados con la implementación de esta alternativa.

5.1.3 Alternativa II: Planta de concentración dentro de la línea de proceso actual. La planta de concentración estaría ubicada en el área actual del proceso de trituración, en la unidad de negocios de Preparación de Minerales y su producto concentrado constituiría la pila de alimentación al proceso actual. Con la

implementación de esta alternativa, el diagrama de flujo de proceso actual se modificaría.

La planta de concentración estaría conformada por la siguiente línea de equipos: Woobler; Trituradora; Zaranda; Rubbler; Zaranda; Molino Autógeno y Zaranda. El diagrama de flujo propuesto para esta alternativa se observa en la figura 21.

Figura 21. Diagrama de flujo propuesto para la alternativa II



Fuente: Estudio de la Fase de Identificación - Upgrading Fase II. CMSA.

Los principales recursos beneficiados son: todo el mineral proveniente de mina, material en stocks intermedios y material proveniente del rechazo del Upgrading I.

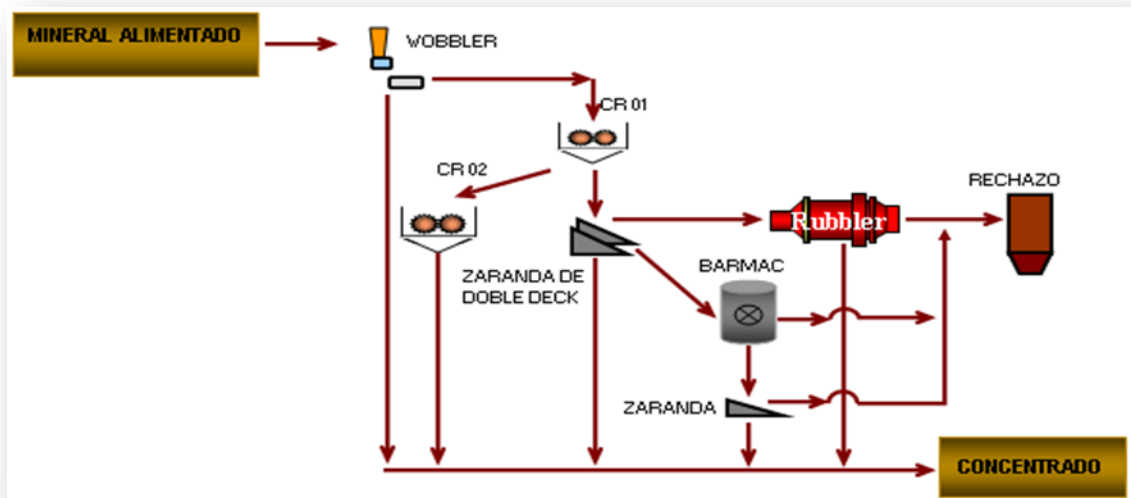
5.1.4 Alternativa III. Planta de concentración en la cual se introduce el molino autógeno tipo BARMAC como una variante a las alternativas propuestas. Esta configuración de la planta de concentración introduce un Molino Autógeno tipo Barmac, el cual entraría a funcionar en paralelo con el Rubbler. Este molino proporciona un mayor grado de liberación de Ni debido al fracturamiento de las rocas por sus planos de debilidad aprovechando las propiedades mecánicas de las rocas y logrando una mayor recuperación másica de Níquel.

El mineral es alimentado por medio de una zaranda de doble deck que divide el mineral para ambos equipos. La localización de la planta de concentración es función de la alternativa escogida tanto integrada al proceso actual como externa a este.

La planta de concentración estaría conformada por la siguiente línea de equipos: Woobler; Trituradora; Zaranda; Rubbler / Barmac y Zaranda. El diagrama de flujo propuesto para esta alternativa se muestra en la figura 22. Con la implementación de esta alternativa el diagrama de flujo de proceso actual se modificaría notoriamente.

Todo el mineral proveniente de la mina, material en stocks intermedios y material proveniente del rechazo del Upgrading I, serian beneficiados por medio de esta alternativa.

Figura 22. Diagrama de flujo propuesto para la alternativa III

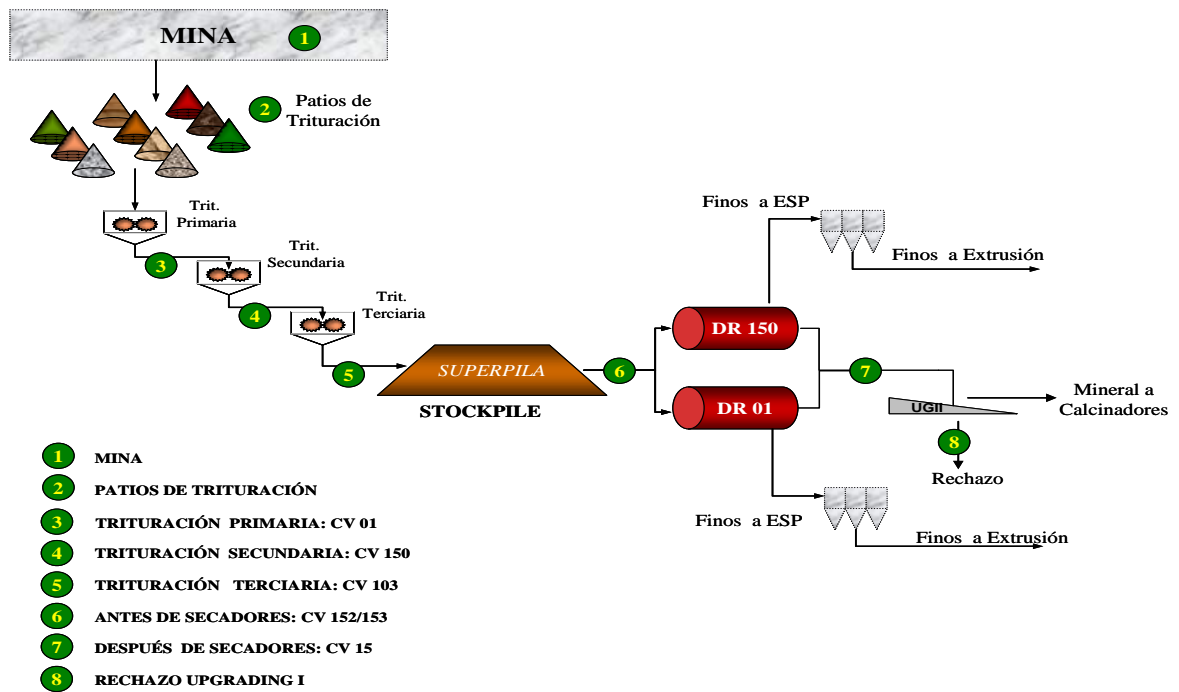


Fuente: Estudio de la Fase de Identificación - Upgrading Fase II. CMSA.

5.2 ANÁLISIS DE LOS ESTUDIOS PRELIMINARES DE CONCENTRABILIDAD

En CMSA, desde el año 2001, han sido desarrollados varios estudios de concentrabilidad que soportan la viabilidad técnica del proyecto Upgrading Fase II. Los ensayos de concentrabilidad se realizaron a partir de muestras de 500 kilogramos de material que representa aproximadamente un lote de 1000 toneladas de material típico en el proceso de construcción de pilas. Las muestras se tomaron en puntos específicos del diagrama de flujo de proceso, los cuales son representados en la figura 23.

Figura 23. Puntos de Muestreo de los Ensayos Preliminares



Fuente: Estudio de la Fase de Identificación - Upgrading Fase II. CMSA.

Los estudios analizados son:

5.2.1 Estudio de Implementación del Upgrading Fase I. En el año 2001 CMSA realizó estudios de concentración de minerales que llevaron a la construcción de la planta de concentración llamada Upgrading I. Este proyecto ayudó a la simplificación del proceso de construcción de pila, al eliminar una etapa de trituración y a la vez generó los espacios para el desarrollo de posteriores estudios. Ver “Documento General del proyecto Upgrading Fase I, CMSA Septiembre de 2002.

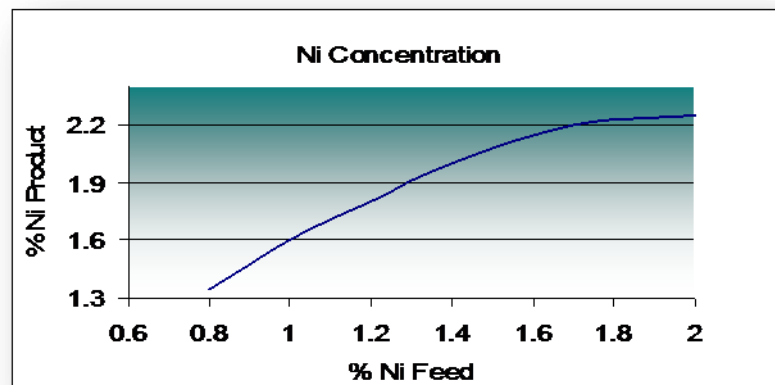
5.2.2 Estudio de Concentrabilidad del Material de Rechazo del Upgrading

Fase I. Este estudio demostró por medio de los análisis de distribución granulométrica y análisis químico por fracción granulométrica, la viabilidad de concentrar los tipos de roca que constituyen el rechazo del Upgrading Fase I y algunos tipos de roca con contenidos de Ni por debajo de ley de corte, que pueden llegar a ser económicamente viables mediante un proceso de concentración.

En su momento no se implementó ningún proyecto, debido a que el grado de Níquel alcanzado estaba por debajo de la ley de corte de Níquel alimentada a los calcinadores. (2.26% Ni en promedio), sin embargo con la ley de Níquel actual (1.0% Ni) el proceso es económica y técnicamente viable alcanzando porcentajes de concentración superiores a la ley de corte.

Los resultados obtenidos en este estudio, se resumen en la gráfica 24 donde se observa el grado de concentrabilidad del material rechazo del Upgrading fase I.

Figura 24. Concentrabilidad del Material de Rechazo del UGI

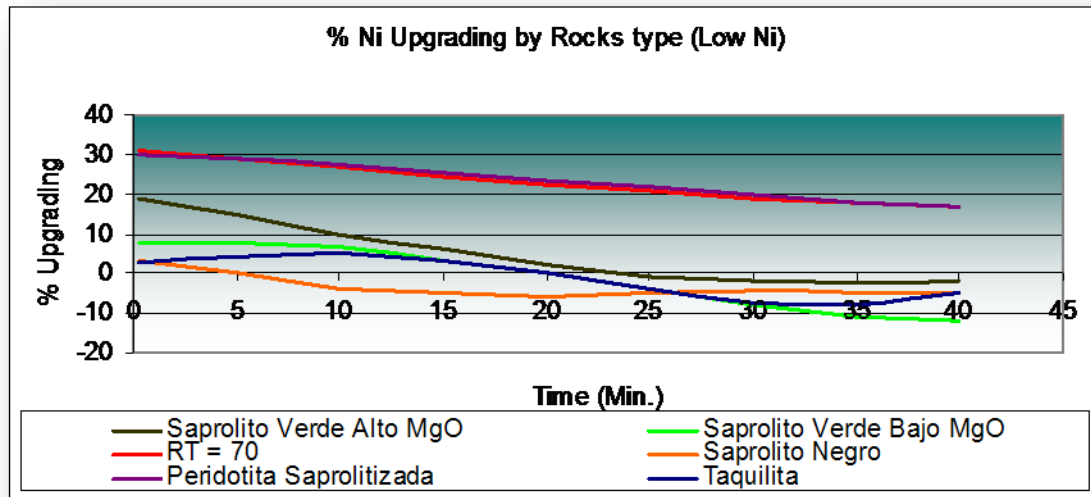


Fuente: Estudio de concentrabilidad del material de rechazo del Upgrading I.

5.2.3 Pruebas de Concentrabilidad para Tipos de Roca Puras. En este estudio se determinó por medio de los análisis químicos y de distribución granulométrica de las muestras obtenidas en los ensayos en el equipo de pruebas rubbler, la concentrabilidad de los diferentes tipos de roca que se explotan en mina y que son enviados al proceso. Los resultados se muestran en la figura 25. De este estudio se pudo concluir:

- Del grupo de materiales (RT) que se envían al proceso, los que más concentrabilidad presentan son la peridotita saprolitizada (RT=50) y la roca 70 (mezcla de peridotita saprolitizada y laterita).
- El grupo de los saprolitos verdes concentran en función del contenido de magnesio, siendo el saprolito verde de alto magnesio el material que mas concentra dentro de este grupo.
- Materiales como saprolito negro y taquilita no presentan ningún tipo de concentración.
- La concentrabilidad de los diferentes tipos de roca es función del porcentaje de Níquel inicial. A menor grado de Níquel inicial será mayor la concentrabilidad.
- Los rechazos de los materiales que presentan mayor concentrabilidad, contienen un 1.0% de Ni.

Figura 25. Concentrabilidad para Tipos de Rocas Puras



Fuente: Estudio de concentrabilidad por tipos de rocas puras. CMSA.

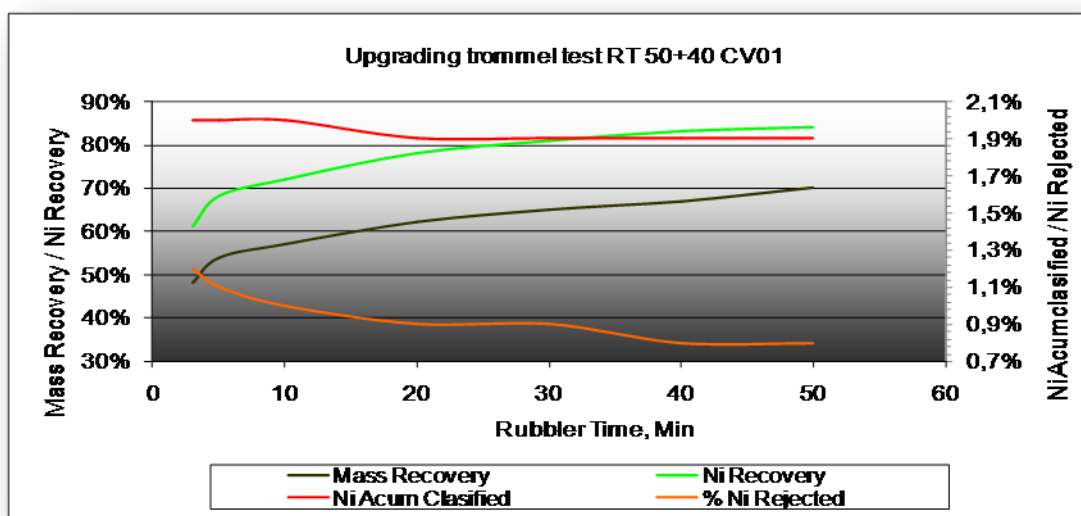
5.2.4 Caracterización y Concentrabilidad para Mezclas de Tipos de Roca y Localización del Sitio Óptimo de Concentración. En este estudio se determinó la concentrabilidad de las diferentes mezclas de materiales que conforman la pila y el sitio en el cual se obtienen los mejores resultados. Estos ensayos fueron realizados en el equipo de pruebas Rubbler que se tiene destinado para tal fin.

Debido a que la mezcla de rocas 50 + 40 (Peridotita sapolitizada + sapolito verde de alto magnesio) ofrecen altos índices de concentrabilidad, se realizó un análisis individual de concentrabilidad para este material y los resultados obtenidos se muestran en la figura 26.

Del estudio se concluyó:

- El material que presentan mayor concentrabilidad de Níquel es la peridotita saprolitizada.
- Las mezclas de materiales que ofrecen mejor concentrabilidad para Níquel son:
 - Peridotita + peridotita saprolitizada;
 - Peridotita saprolitizada + laterita
 - Peridotita saprolitizada + Saprofito verde de alto magnesio
- La mejor concentrabilidad para los tipos de rocas y para las mezclas ensayadas se presentan siempre después de una primera fase de trituración.
- Una segunda etapa de trituración genera dilución.

Figura 26. Concentrabilidad para Mezclas de Tipos de Rocas



Fuente: Estudio de concentrabilidad para mezclas de rocas puras. CMSA.

5.2.5 Conclusiones Finales de los Ensayos Preliminares.

- El mejor lugar para concentrar los tipos de roca presentes en la pila de alimentación al proceso es después de la primera trituradora. (CR01)
- Una segunda fase de trituración genera dilución del material previamente triturado.
- A menor porcentaje de Níquel alimentado al proceso, se obtiene un mayor grado de Upgrading de Níquel.
- Rocas con alto contenido de Níquel no deben ser concentradas ($\%Ni > 1.8$)
- El proceso de concentración deberá ser enfocado hacia tipos de roca con alto MgO debido a que su concentrabilidad es función del contenido de magnesio y a materiales de baja ley de Níquel.

5.3 VALIDACIÓN DEL DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA DE CONCENTRACIÓN DE NIQUEL UPGRADING FASE II

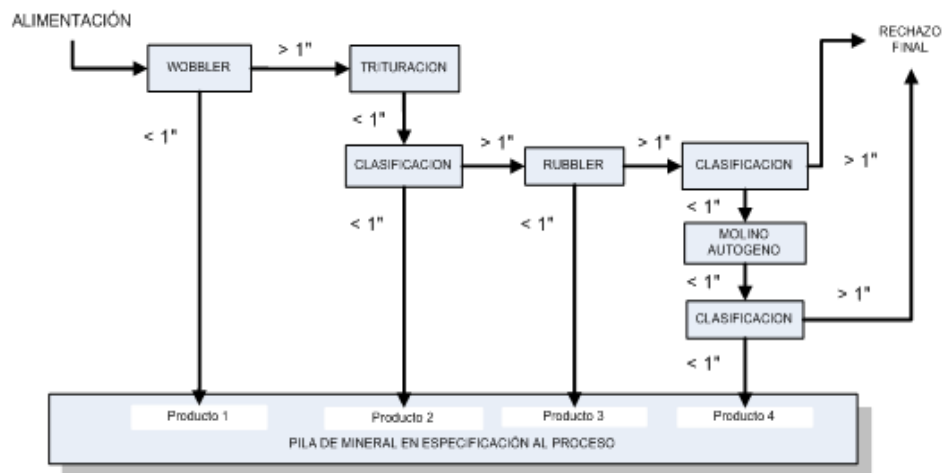
El diseño conceptual propuesto para la planta de concentración Upgrading Fase II, el cual representa la parte central de cada una de las alternativas propuestas, se muestra en la figura 27. Este modelo permite la concentración del mineral en varias etapas, obteniéndole a lo largo del mismo cuatro productos, cada uno de los cuales tiene diferente grado de concentración de Níquel y recuperaciones másicas. Los procesos que intervienen en el modelo propuesto son:

1. Proceso Wobbler: Proceso de clasificación en húmedo que permite el manejo de materiales con contenidos de humedad superiores al 20%. Este proceso ha sido probado con éxito en otras plantas de concentración de

minerales níquelíferos. Esta etapa origina el primer producto, con mayor ley pero con menor recuperación másica de Níquel.

2. Trituración primaria / Clasificación secundaria: Etapa que permite la liberación de contenidos de Níquel en rocas duras. El material liberado constituye el producto número dos.
3. Proceso de trituración y clasificación Rubbler: Equipo rotatorio diseñado para la liberación de contenidos níquelíferos meteorizados en las superficies de rocas duras, mediante el desgaste por fricción. El material liberado constituye el producto número tres.
4. Trituración autógena / Clasificación cuaternaria: Proceso diseñado para la liberación de partículas níquelíferas insertadas dentro de la roca madre. Su liberación ocurre por choque entre rocas, las cuales se rompen por los planos de debilidad. El material liberado constituye el producto número cuatro.

Figura 27. Diseño Conceptual de la Planta de Concentración Upgrading II



Fuente: Estudio de la Fase de Identificación - Upgrading Fase II. CMSA.

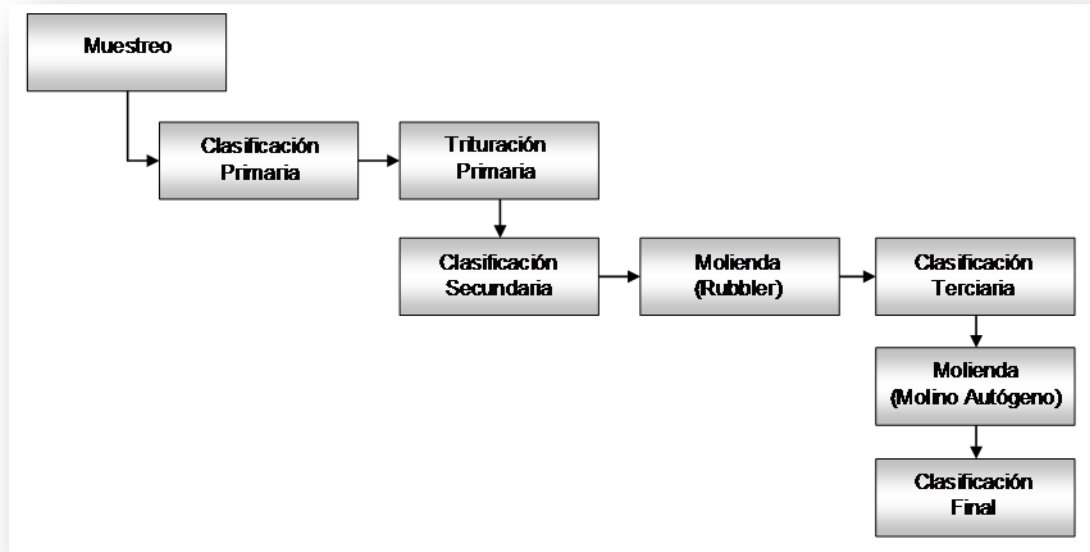


En busca de determinar la viabilidad técnica del diseño conceptual de la planta de concentración, se construyó una planta piloto de concentración por parte del equipo de ingeniería de CMSA, que representa el proceso propuesto por medio de un circuito de concentración a escala; en el cual, se realizaron diferentes ensayos para distintos escenarios (mineral de alta ley, mineral de baja ley y mineral de ley variable) asegurando en estos, un mínimo nivel de riesgo para cada tarea específica realizada en campo.

Las operaciones unitarias que intervienen en el circuito de concentración de la planta piloto se muestran en la figura 28.

Para la realización de los ensayos en la planta piloto, se analizaron muestras tomadas en los patios de trituración de mina, que representan los diferentes tipos y mezclas de roca utilizadas en el proceso de construcción de pila, la cual es la materia prima para el proceso de producción de Níquel en CMSA.

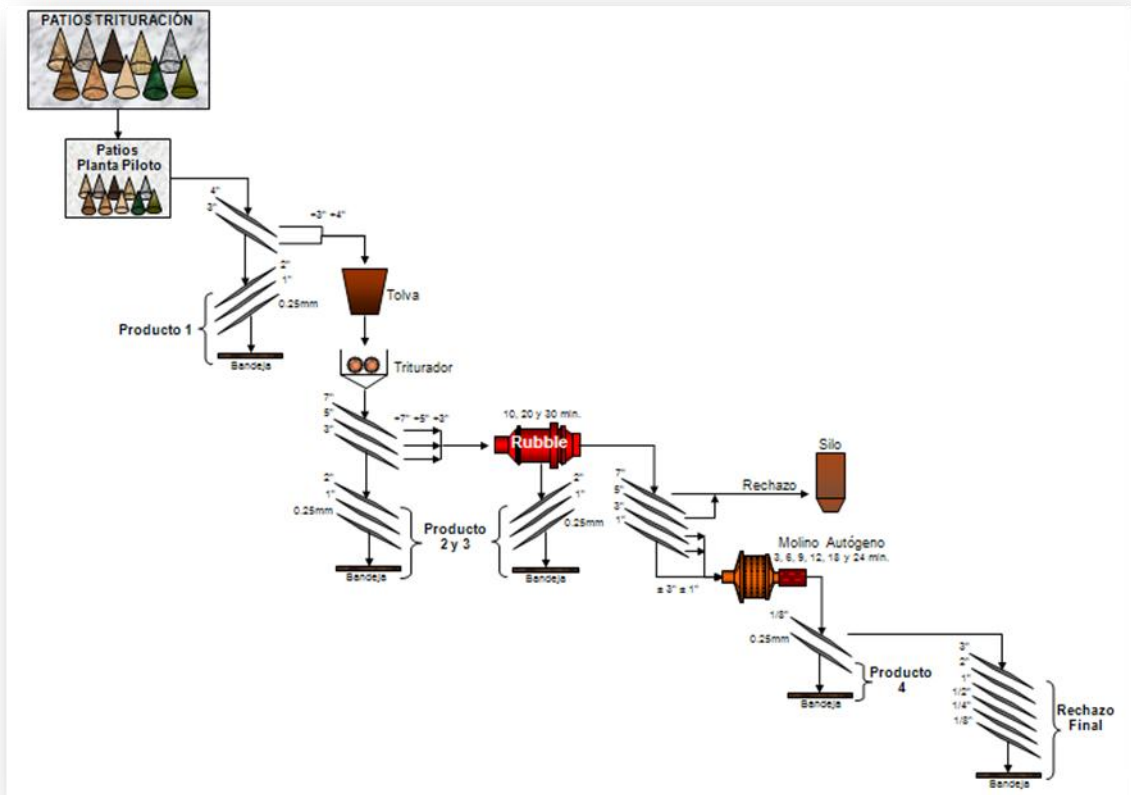
Figura 28. Diagrama de Bloque de Operaciones Unitarias del Circuito de Concentración Upgrading II



Las variables de diseño y operación de cada etapa unitaria involucrada en el diseño conceptual de la planta de concentración, fueron determinadas por el consultor externo del proyecto contratado para tal fin.

Una vez determinadas las variables de operación óptimas para cada equipo, se ejecutaron los ensayos de concentrabilidad haciendo pasar el mineral por el circuito completo de concentración mostrado en la figura 29. Las muestras recolectadas fueron sometidas a pruebas de análisis químico para determinar su composición química y granulometría.

Figura 29. Diagrama de Flujo de la Planta Piloto de Concentración



Fuente: Estudio de la Fase de Identificación - Upgrading Fase II. CMSA.

5.3.1 Procedimiento General de los Ensayos en Planta Piloto.

1. Selección y verificación del material a analizar en el patio de trituración de Mina.
2. Toma de muestras del material seleccionado por medio del sistema cargador/camión.
3. Ubicación en el patio de la planta piloto del material proveniente del patio de trituración, en forma de pilas.

4. Selección de una muestra representativa (aproximadamente 1 tonelada humedad) de la pila a analizar, verificando su peso en la báscula y registrando este último dato en las libretas de campo.
5. Clasificación primaria utilizando zaranda con mallas 4", 3" y fondo.
6. Tamizado del material pasante en la malla 3" utilizando una zaranda con mallas 2", 1", 0.25mm y fondo (finos). El contenido de cada fracción se pesó, empacó e identificó de acuerdo al procedimiento estándar, enviándose al laboratorio para su análisis químico respectivo.
7. Registro del peso del material retenido en las mallas 4" y 3" separadamente.
8. Transporte y disposición del material retenido en las mallas 4" y 3" en la tolva del triturador para su reducción de tamaño.
9. Clasificación secundaria del material triturado utilizando zaranda de mallas 7", 5", 3" y fondo.
10. Tamizado del material clasificado (< 3") utilizando zarandas con mallas 2", 1", 0.25mm y fondo. El contenido de cada fracción se pesó, empacó e identificó de acuerdo al procedimiento estándar, enviándose al laboratorio para su análisis químico respectivo.
11. Registro de peso del material retenido en las mallas 7", 5" y 3" separadamente.
12. Alimentación al equipo de concentración Rubbler con las fracciones retenidas en las mallas 7", 5" y 3".
13. Procesamiento del material en el Rubbler para 10, 20 y 30 minutos de residencia.
14. Tamizado del producto clasificado en el Rubbler para cada tiempo de operación, utilizando zarandas con mallas 2", 1", 0.25mm y fondo. El contenido de cada fracción se pesó, empacó e identificó de acuerdo al procedimiento estándar, enviándose al laboratorio para su análisis químico respectivo.

15. Clasificación terciaria al material de rechazo del Rubbler utilizando una zaranda con mallas 7", 5", 3", 1" y fondo.
16. Registro de peso del material retenido en las mallas 7" y 5" separadamente.
17. Registro de peso del material pasante en la malla 5" (retenido en las mallas 3", 1" y fondo).
18. Procesamiento del material pasante en la malla 5" (retenido en la malla 3" y fondo) en el molino autógeno para 3, 6, 9, 12, 18 y 24 minutos de residencia.
19. Clasificación del material en el molino autógeno utilizando una zaranda de malla 1/8".
20. Tamizado del material clasificado del molino autógeno ($< 1/8"$) utilizando una zaranda con malla 0.25mm y fondo. El contenido de cada fracción se pesó, empacó e identificó de acuerdo al procedimiento estándar, enviándose al laboratorio para su análisis químico respectivo.
21. Tamizado del material rechazado del molino autógeno ($> 1/8"$) utilizando una zaranda con mallas 3", 2", 1", 1/2", 1/4", 1/8" y fondo. El contenido de cada fracción se pesó, empacó e identificó de acuerdo al procedimiento estándar, enviándose al laboratorio para su análisis químico respectivo.

5.3.2 Ensayos de Concentrabilidad Realizados. Para determinar el comportamiento del mineral a través del proceso propuesto y obtener índices de concentrabilidad, recuperaciones de masa y de Níquel y una aproximación al porcentaje de finos generados con la puesta en marcha de la planta de concentración, se realizaron diferentes planes de ensayos con mezclas de tipos de rocas simulando el material típico que constituye la pila de alimentación al proceso actual. Estos tipos de roca son: laterita, saprolito verde de alto magnesio, peridotita saprolitizada y peridotita (RT = 20+40+50+60).

Cada una de las series de ensayos realizados, evaluaba diferentes escenarios dentro del mineral que constituye la pila de alimentación al proceso; como alta ley, baja ley, ley variada, material estéril, material de bajo Upgrading, etc.

Cada muestra obtenida, para cada serie de ensayos, fue sometida según el procedimiento general de los ensayos en planta piloto. Los resultados obtenidos en cada etapa del procedimiento, fueron registrados en las libretas de campo respectivas, bajo los formatos previamente establecidos entre la unidad de negocios de Proyectos de Producción y la firma contratista encargada de los ensayos.

Con la información obtenida del análisis químico y distribución granulométrica de las muestras, la cual se encuentra documentada y contenida en el estudio final de Identificación del proyecto Upgrading Fase II en CMSA, se elaboró un balance de masa utilizando los datos promedios de cada producto concentrado, calculando los % de Ni acumulado, % de masa recuperada y acumulada, % de Upgrading por productos y acumulado; así como los % de finos para cada muestra analizada. Los datos promedios del balance de masa global para la validación del diseño conceptual de la planta de concentración, por medio de los ensayos de la planta piloto se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultado del Balance de Masa de los Ensayos en Planta Piloto

Equipo	Producto	Recuperación de Masa Acumulada %	Recuperación de Masa Ni Acumulada %	Ley de Ni Acumulada %	Upgrading de Ni Acumulado %	Finos Acumulados %
	Muestra Inicial	100	100	1.34	0.0	100
Woobler	P1	28.0	31.5	1.43	6.1	2.1
Clasificador	P2	57.9	62.7	1.42	5.6	2.9
Rubler	P3	62.3	68.6	1.45	7.5	3.7

	P4	64.8	71.5	1.45	7.9	4.3
	P5	66.9	73.9	1.45	7.9	5.0
Rechazo 1	P6	9.9	8.6	0.89	-33.6	0.0
Molino Autógeno	P7	69.7	77.8	1.47	9.3	6.0
	P8	71.8	80.5	1.48	9.8	6.8
	P9	73.5	82.4	1.48	10.0	7.4
	P10	74.9	83.9	1.48	10.0	7.9
	P11	77.0	85.9	1.48	9.7	8.7
	P12	78.8	87.3	1.47	9.3	9.4
Rechazo 2	P13	21.5	12.7	0.78	-42.1	0.0

Fuente: Estudio de la Fase de Identificación - Upgrading Fase II. CMSA.

5.3.3 Estimación de la Generación de Finos. CMSA, ha definido como finos, todos aquellos materiales con tamaño menor a 0.25mm. Durante la realización de los ensayos en planta piloto, se llevaron a cabo mediciones de distribución granulométrica para cada uno de los productos con el fin de determinar la generación de finos con la implementación de este proyecto.

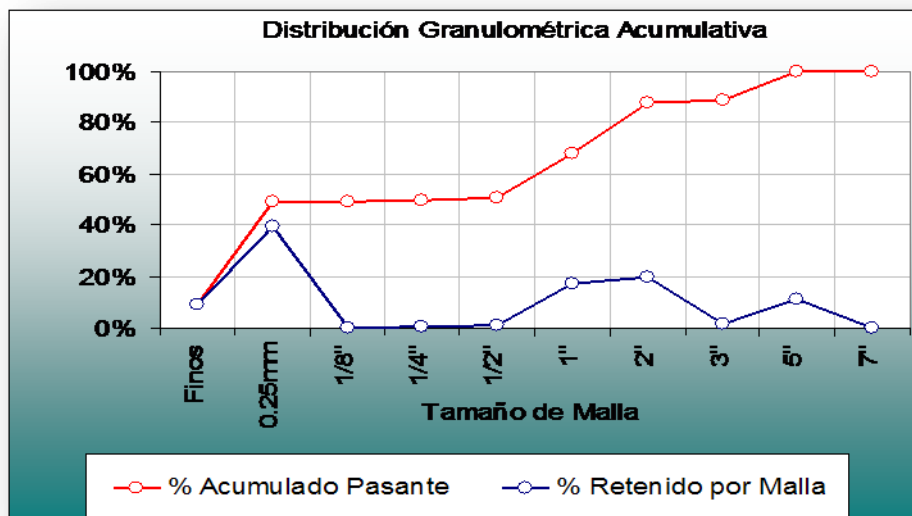
Con los resultados de distribución granulométrica obtenidos en la planta piloto mostrados en la tabla 5, se construyó la curva de distribución granulométrica mostrada en la figura 30, que representa el comportamiento del mineral analizado.

Tabla 5. Distribución Granulométrica del Ensayo de Concentrabilidad

Granulometría	% Retenido en cada malla	% Pasante en cada malla
Finos	9.4	90.64
0.25mm	39.8	60.21
1/8"	0.0	100
1/4"	0.5	99.54
1/2"	1.1	98.92
1"	17.5	82.55
2"	19.6	80.38
3"	1.3	98.69
5"	10.9	89.06
7"	0.0	100

Fuente: Estudio de la Fase de Identificación - Upgrading Fase II. CMSA.

Figura 30. Curva de Distribución Granulométrica para los Ensayos en Planta Piloto



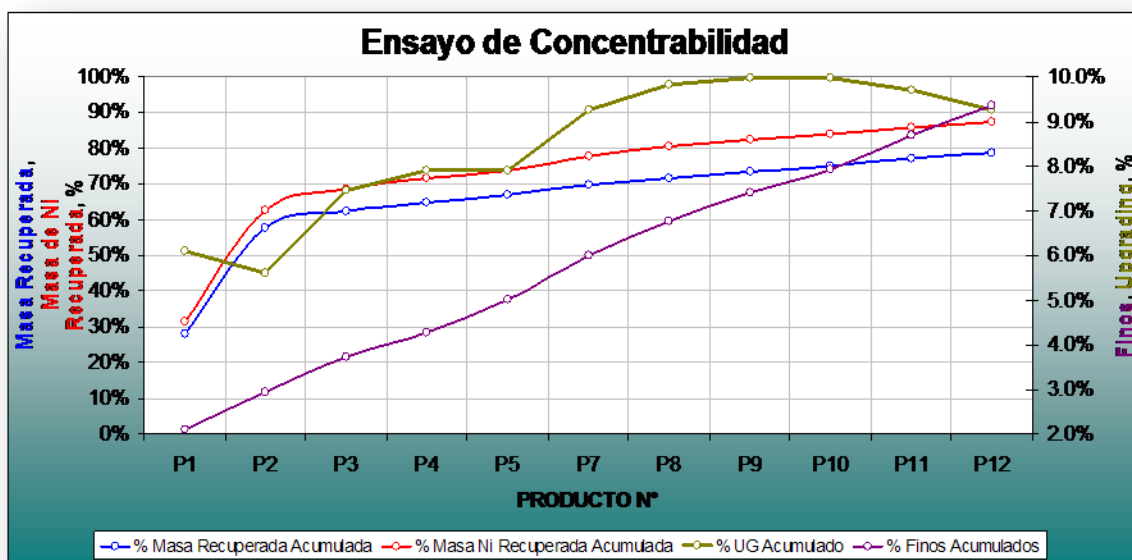
Fuente: Estudio de la Fase de Identificación - Upgrading Fase II. CMSA.

5.3.4 Generación Actual de Finos. Actualmente en el proceso de secado son enviados a extrusión, entre 10 y 15 tph de finos; mientras el mineral contiene entre 10 y 13% de finos al finalizar la etapa de secado, equivalente a una generación de finos entre 48 a 55 tph. Una rata de producción de 60 tph de finos es manejada actualmente. Con la implementación del proyecto Upgrading Fase II y tomando como premisa una alimentación de 1000 tph a la planta de concentración, se producirán 90 tph de finos aproximadamente, lo cual representa un incremento del 3% en promedio de la rata de finos manejada.

Esta rata de producción de finos con la implementación del proyecto Upgrading Fase II, es calculada a partir de los datos mostrados en la tabla 4 y que corresponde al porcentaje de finos acumulados en el producto 12 del molino autógeno.

5.3.5 Análisis de Resultados de los Ensayos en Planta Piloto. Los valores consignados en la tabla 4, correspondientes a los balances de masa elaborados con los datos promedios de los resultados de los ensayos en planta piloto, son la base para la elaboración de la figura 31. Esta figura reúne y expone todos los resultados obtenidos en promedio y permite visualizar el comportamiento del material a través de cada etapa del circuito de concentración propuesto.

Figura 31. Caracterización Metalúrgica del Material Analizado



Fuente: Estudio de la Fase de Identificación - Upgrading Fase II. CMSA.

Del análisis grafico se puede resaltar: el alto grado de recuperación másica de Níquel el cual fue de 87.3%, del mismo modo que la recuperación másica total, del orden de 78.8%. El Upgrading final, acumulado a lo largo del proceso fue de 9.3% superando el grado de Upgrading logrado actualmente con el Upgrading I. La



cantidad máxima de finos generados corresponde a 9.4%, superando la cantidad actual de material fino procesado.

El comportamiento del material mostrado a través de cada etapa que compone el circuito de concentración propuesto, corresponde con el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos preliminares, ratificando su concentrabilidad. Si suponemos que el material analizado corresponde en un 100% al material utilizado en el proceso de construcción de pila, garantizando su presencia y sobre el cual solo pudieran existir variaciones significativas en su composición química en casos especiales propios del proceso como variaciones en la relación sílice/magnesio; se asegura un incremento significativo de la ley del material enviado a proceso, lo cual demuestra la viabilidad técnica de este proyecto.

Otro aspecto por resaltar, con base en el análisis de la figura 31, es la importancia del Molino Autógeno dentro de la línea de equipos que componen el diseño propuesto. Este equipo permite un alto grado de concentrabilidad de Níquel aun cuando sus recuperaciones másicas no son tan significativas. La máxima recuperación másica se logra en las dos primeras etapas (Wobbler y Clasificación Primaria después de trituración), sin embargo la ley de Níquel desciende en el producto de clasificado como un posible efecto de la dilución causada por una trituración excesiva.

El desempeño y validación del circuito de concentración propuesto que simula el diseño conceptual de la planta de concentración Upgrading Fase II, puede verificarse por medio de los valores obtenidos en los productos de rechazo del circuito (que corresponden a P6 y P13 de la tabla 4), los cuales contienen material pobre en Níquel (menor a la ley de corte actual de 1% de Ni) que corresponden al 21.5% de la masa total y al 12.7% de la masa total de Níquel; indicando la buena eficiencia del diseño propuesto.

5.3.6 Conclusiones y Recomendaciones de los ensayos en planta piloto.

- El material ensayado es sensible a los métodos de concentración propuestos, arrojando un Upgrading final del 9.4%, el cual supera el porcentaje de Upgrading actual obtenido con la primera fase del Upgrading, que oscila entre 4 a 5%.
- Debido a las características litológicas de los materiales analizados, es posible que para algunos de estos materiales, no sea necesario pasar por el circuito completo de concentración.
- Con la implementación de la segunda fase del Upgrading, se obtendrá una pila de alimentación al proceso actual más homogénea y con una granulometría aproximada del 60% del material menor a 2”.
- Se estima que el porcentaje adicional de finos que se producirían al incluir la planta de concentración de Upgrading fase II, es del orden del 3%. Este diferencial de finos (3%) se generaría si es incluido el Molino Autógeno dentro de la línea de equipos, dado que es allí en donde se produce el 50% de los finos totales de la nueva planta.
- Los equipos propuestos y simulados en la planta piloto para validar los ensayos de concentrabilidad, en especial el Rubbler y Molino Autógeno, deberán ser optimizados por medio de una serie de nuevos ensayos, en los cuales sus variables operativas sean modificadas con miras a establecer la variabilidad en la eficiencia de cada equipo dentro del proceso propuesto.

5.4 ANÁLISIS DE RIESGOS PARA EL PROYECTO UPGRADING FASE II

5.4.1 Situaciones de Riesgo. Las situaciones de riesgo asociadas al proyecto, fueron determinadas de acuerdo al estándar No.2 del EWRM (norma para la dirección de riesgos de la compañía). Las principales situaciones de riesgo se originaron de un ejercicio de valoración de riesgos para el proyecto Upgrading Fase II, el cual contó con la participación de los clientes directos del proyecto, personal de HSEC (unidad de negocios de salud, seguridad, ambiente y comunidad) y equipo líder del proyecto. La valoración de riesgos del proyecto consistió en el seguimiento de la norma citada anteriormente, en la cual una lista de control de riesgos es utilizada como punto de partida y es realizado un posterior aporte de los miembros del equipo de trabajo sobre los posibles riesgos significativos del proyecto, una vez el proyecto ha sido explicado en su totalidad. La valoración se enfocó a aspectos de HSEC, operacionales, técnicos y económicos.

En la valoración de riesgos las principales causas, los impactos potenciales y las acciones de control existentes ó futuras acciones a tomar fueron documentados. El formato de registro y presentación de riesgos se realizó de acuerdo al EWRM Guideline No. 1.1 (Risk Registers and Presentation).

Algunos riesgos asociados al proyecto son:

Riesgos ambientales:

- Emisión de material particulado.
- Contaminación auditiva.
- Descargas y drenajes fuera de control.

Riesgos técnicos:

- Mal funcionamiento de la planta por una capacitación deficiente de los operarios.
- Bajo porcentaje de Upgrading en la planta implementada.
- Mal diseño y dimensionamiento de equipos.
- Modificación de las variables operativas del proceso RKEF.
- Incremento de finos en el proceso.
- Ubicación de la planta de concentración en zonas mineralizadas.

Riesgos económicos:

- Disminución del EBIT y VPN.
- Descenso en el precio del Níquel.

Otros riesgos:

- Disminución de las reservas de la Mina.
- Descompensación en el descenso de la ley del Ni en la mina.
- Parada de línea de producción por construcción o instalación de la planta de Upgrading.

5.4.2 Estrategias de Control de Riesgos. En la valoración de riesgos se identificaron los controles existentes y los requeridos para eliminar o mitigar el nivel de riesgo a un nivel tolerable. Estos controles serán incorporados dentro del plan de dirección de riesgos y planes de control ó mitigación que deberán iniciarse en el estudio de la fase de Selección. Los riesgos ambientales y operacionales serán analizados en primera instancia.

5.4.3 Plan de Dirección de Riesgos. El plan de dirección de riesgos se implementará durante la etapa de Selección del proyecto y estará alineado con las



políticas y reglas del sistema interno de gerencia de riesgos de BHP Billiton (EWRM). En la fase de Selección se especificará en detalle cada acción de control para cada riesgo encontrado en esta etapa del estudio de identificación. Se llevarán a cabo consultas externas para la revisión de los análisis de riesgo e internas para la mitigación de los problemas de riesgo por parte del equipo de HSEC de CMSA.

5.5 PLAN DE TRABAJO PARA LA SIGUIENTE FASE DE SELECCION

5.5.1 Objetivo del Estudio de la Fase de Selección. El objetivo principal del estudio de la fase de Selección es demostrar cuál de las alternativas propuestas en el estudio de Identificación para el desarrollo del proyecto Upgrading Fase II, es la más viable técnicamente y económicamente para la organización de BHP Billiton; que amerite un estudio posterior en la siguiente fase de Definición, basándose en una comparación completa entre las alternativas y presentando los perfiles de riesgo/beneficio para cada una de éstas.

Dentro de los objetivos del proyecto Upgrading Fase II para la fase de Selección se destacan los siguientes:

- Presentar la alternativa escogida y su base de selección en comparación con las alternativas propuestas.
- Presentar los análisis económicos de la alternativa escogida.
- Consolidar el beneficio económico del proyecto.
- Disminuir el rango de incertidumbre de las estimaciones según los estándares de BHP Billiton.

- Proponer un plan de trabajo para esta fase, estimar sus costos y tiempo de ejecución.
- Proponer un plan de control de riesgos de HSEC para el proyecto.
- Elaborar los balances de masa y energía necesarios para soportar el proyecto.
- Diseñar un modelo de evaluación para la fase de Definición.

5.5.2 Entregables del Estudio de la Fase de Selección.

- Valoración de la técnica probable y viabilidad económica del set de alternativas.
- Estudios de las diferentes configuraciones del proyecto.
- Rasgos generales de las oportunidades de inversión.
- Consideración de las capacidades para el proyecto.
- Desperfectos/riesgos fatales del proyecto.
- Perfil de riesgos/beneficio e incertidumbres.
- Plan de trabajo a realizarse en la fase de definición.
- Cronograma del plan de trabajo y costos de desarrollo de la fase de definición.

5.5.3 ‘Killers’ Potenciales del Proyecto. Los posibles factores que ocasionarían, la no ejecución del proyecto por parte de BHP Billiton están enfocados a:

- El cambio en la especificación del mineral que constituye la pila de alimentación; además de variaciones en las especificaciones de operación de la planta.
- El exceso en la cantidad de finos enviados a proceso para los cuales, los controles existentes sean insuficientes para su tratamiento.

- Incremento en los costos de capital por invalidez de la oferta cotizada para la compra de equipos.
- Una logística e infraestructura inadecuada para el manejo de la materia prima y productos (concentrado, rechazo, stocks intermedios, mina, etc.)
- La recuperación global del proceso productivo de Níquel se vea afectada negativamente por la implementación del proyecto.
- Exceso de material que sobrepase los límites de disponibilidad de los equipos.
- Frecuencia de fallas de proceso, debido a taponamientos de las zarandas por el manejo de material con alto contenido de humedad.
- Descenso en el precio del Níquel o momento estratégico inoportuno.
- El incumplimiento de los requerimientos mínimos descritos en los estándares de capital de inversión de BHP Billiton.

6. CONCLUSIONES

- La redacción del estudio de la fase de Identificación del proyecto Upgrading Fase II, que contiene los requerimientos mínimos y cumple con la definición, propósito y alcance descritos en el “Estándar de Inversión de Capital para la Fase de Identificación”, permitió al comité ejecutivo de CMSA, validar el proyecto y aprobar el presupuesto necesario para continuar con la siguiente fase de Definición.
- La realización de las actividades según la metodología de trabajo propuesta por la unidad de negocios de proyectos de producción y descritas en este informe, fueron claves para la ejecución de la etapa de documentación de la fase de Identificación, al igual que la recopilación de información de los documentos relacionados al proyecto entre las demás unidades de negocios para la redacción final.
- Por medio del análisis de los estudios preliminares de concentrabilidad realizados sobre el material de rechazo del Upgrading Fase I, los tipos de rocas puras y mezclas de éstas, realizados con anterioridad en CMSA, se determinó la viabilidad técnica de los procesos de concentración con base a la ley de corte actual (1.0% de Ni).
- Un concepto favorable en la validación del diseño conceptual de la planta de concentración del proyecto Upgrading Fase II, fue emitido por el autor de este proyecto con base en el análisis de resultados realizados sobre los ensayos de concentrabilidad en la planta piloto, los cuales muestran alta recuperación másica total y de Níquel, un porcentaje de upgrading alcanzado superior al

actual y una baja masa total rechazada con contenidos de Níquel inferiores a la ley de corte de 1.0% de Ni.

- Con los datos obtenidos en los ensayos en planta piloto, se construyó un balance de masa global que contiene los valores promedios de los datos obtenidos para cada serie de ensayos realizados, independiente de la alternativa planteada, que simulan el diseño conceptual de la planta de concentración propuesta, mostrando una recuperación másica de Níquel de 87.3%, recuperación másica total de 78.8%, Upgrading final de 9.3% y una cantidad máxima de finos generados de 9.4%.

7. RECOMENDACIONES

- Es fundamental para el desarrollo del proyecto Upgrading Fase II, que el estudio de la fase de Selección a desarrollarse en la siguiente etapa del proyecto, contenga a cabalidad todos los requerimientos mínimos consignados en los módulos de capital de inversión de BHP Billiton para la fase de Selección.
- En el estudio de Selección, se deberán evaluar las posibles alternativas de implementación de la planta de concentración, basándose en estudios ingenieriles, económicos y ambientales para seleccionar la alternativa más viable técnica y económicamente.
- En la realización de los ensayos de concentrabilidad es necesario como parte del control, validación y supervisión, certificar que el personal encargado para tal labor cumpla con las habilidades requeridas, evitando así obtener datos no representativos del material analizado.

BIBLIOGRAFÍA

Textos.

1. HEAP LEACHING PROCESS FOR LOW GRADES ORES. Concept study report. Cerro Matoso S.A. June 2005*
2. UPGRADING FASE I. Concept study report. Cerro Matoso S.A. September 2001*
3. McCABE, WARREN L. Operaciones unitarias en ingeniería química. Cuarta Edición. Editorial Mc Graw Hill.
4. MESA, Ignacio. Manejo de Sólidos Particulados. Ediciones PUB Medellín, Colombia 1990.
5. METALLIC NICKEL RECOVERY FROM SLAG PROJECT. Pre-Feasibility Study. Cerro Matoso S.A. June 2004*
6. RAY S. Martyn, Johnston David. Chemical Engineering Design Project. Gordon and Breach Science Publisher. Vol 6.



Normas.

1. BHP BILLITON. Standard for a Identification Phase Study. March 2007. Version 2.1.*
2. BHP BILLITON. Investment Policy. March 2007. Version 5.0*

(*) Documentos confidenciales protegidos bajo normas internas de propiedad intelectual, por parte del departamento jurídico de Cerro Matoso S.A.