

**MODELO DE AUTOMATIZACION PARA EL PROCESO DE MOLIENDA DE
MINERAL AURO ARGENTIFERO.**

**DAIRO ALBERTO MENCO PADILLA
JHON FREDY VALENCIA PINO**

**INSTITUCION UNIVERSITARIA DE ENVIGADO
FACULTAD DE INGENIERIAS
INGENIERIA ELECTRONICA
ENVIGADO
2011**

**MODELO DE AUTOMATIZACION PARA EL PROCESO DE MOLIENDA DE
MINERAL AURO ARGENTIFERO.**

**DAIRO ALBERTO MENCO PADILLA
JHON FREDY VALENCIA PINO**

Trabajo de grado presentado para optar al título de ingeniero electrónico

Asesor

**LUIS EDUARDO GARCIA JAIME
Ingeniero de instrumentación y control**

**INSTITUCION UNIVERSITARIA DE ENVIGADO
FACULTAD DE INGENIERIAS
INGENIERIA ELECTRONICA
ENVIGADO
2011**

DEDICATORIA

A Dios por darnos el don de la vida; así como las fuerzas para seguir adelante en este proyecto de vida.

A nuestros padres, cuya orientación y ejemplo nos han guiado por el camino correcto.

A la sociedad minera de Colombia, para que próxima mente se haga realidad este proyecto.

A mis compañeros de la carrera, sien ellos la vida universitaria no resultaría tan amena.

A todos los profesores de la facultad de ingenierías electrónica por trasmitirnos su conocimiento.

A nuestro profesor y asesor Luis Eduardo García por su confianza, disposición y dedicación.

A la institución universitaria de envigado por la motivación para realizarnos en nuestros estudios.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente le damos gracias a Dios y a nuestras familias, por ese apoyo incondicional, por creer en nosotros y habernos brindado la oportunidad de hacer realidad parte de nuestro proyecto de vida.

Muchísimas gracias a nuestro asesor, Luis Eduardo García Jaime, por todo el acompañamiento en nuestro proceso de formación y por toda su enseñanza.

CONTENIDO

	Pag
INTRODUCCION	
1. PRESENTACION DEL TRABAJO DE GRADO	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.1.1 FORMULACION	20
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo general	20
1.2.2 Objetivos específicos	20
1.3 JUSTIFICACION	21
1.4 DISEÑO METODOLOGICO	21
1.4.1 MODALIDAD DE TRABAJO DE GRADO	21
1.4.2 ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS	22
1.5 PRESUPUESTO	23
1.6 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	28
2. DETERMINACION DE EQUIPOS E INFRAESTRUCTURA PARA EL PROCESO DE MOLIENDA DE MINERAL AURO ARGENTIFERO	29
2.1 ELEMENTOS CONCEPTUALES PARA EL PROCESO DE MOLIENDA DE MINERAL AURO ARGENTIFERO	29
2.1.1 MOLIENDA	29
2.1.2 ETAPAS DE LA MOLIENDA	30
2.1.3 MECANISMOS DE MOLIENDA	31
2.2 TIPOS DE MOLINOS CILINDRICOS	32

2.2.1 MOLINO DE BARRAS	32
2.2.2 MOLINO DE BOLAS	33
2.2.3 MOLINO AUTOGENO	34
2.2.4 VARIABLES OPERATIVAS DE LOS MOLINOS	34
2.4 DESCRIPCION DEL MOLINO DE BOLAS	36
2.5 OPERACIÓN DE MOLINOS DE BOLAS	37
2.5.1 OPERACIÓN EN CIRCUITO ABIERTO	37
2.5.2 OPERACIÓN EN CIRCUITO CERRADO	38
2.5.3 OPERACIÓN DE MOLIENDA EN VIA SECA	39
2.5.4 OPERACIÓN DE MOLIENDA EN VIA HUMEDA	39
2.6 TEORIAS DE TRITURACION	39
2.6.1 TEORIA DE RITTINGER	39
2.6.2 TEORIA DE BOND	40
2.7 ANTECEDENTES DE AUTOMATIZACION Y MEJORAMIENTO EN EL PROCESO DE MOLIENDA DEL MINERAL AURO ARGENTIFERO	40
2.7.1 AMPLIACION DEL PROCESO DE MOLIENDA FLOTACION DELTA	41
2.7.2 SISTEMA DE CONTROL OPTIMIZANTE PARA PLANTAS DE MOLIENDA SEMIAUTOGENA	41
2.7.3 INSTALACIÓN DE CIRCUITO MOLIENDA FLOTACIÓN PLANTA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE ATACAMA	42
2.8 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL	43
2.9 HIDROCICLON	44
3 ESPECIFICACIONES Y CRITERIOS DE DISEÑO DEL MOLINO E HIDROCICLON	46
3.1 PARAMETROS DE DISEÑOS	46
3.2 CRITERIOS DE DISEÑO	46
3.2.1 TAMAÑO Y PESO DE LA MAQUINA	46

3.2.2 FUENTE MOTRIZ Y ELECTRICA	47
3.3 PARAMETROS DE OPERACIÓN DEL MOLINO	48
3.3.1 VELOCIDAD DEL MOLINO	48
3.3.2 CAPACIDAD DEL MOLINO	49
3.3.3 CONSUMO DE POTENCIA DEL MOLINO	50
3.4 ALTERNATIVAS DE REDUCCION DE VELOCIDAD	52
3.4.1 ALTERNATIVA 1 REDUCTORES DE VELOCIDAD DE PIÑONES	52
3.4.2 ALTERNATIVA 2 TRANSMISION POR CORREAS Y POLEAS	57
3.4.3 VARIADOR DE VELOCIDAD	64
3.5 CARACTERISTICAS DEL DISEÑO DE HIDROCICLON	66
3.6 MODELOS Y ESPECIFICACIONES HIDROCICLONES	70
4 DISEÑO DE AUTOMATIZACION DE CIRCUITO DE MOLIENDA Y CLASIFICACION	73
4.1 ALTERNATIVA 1	75
4.2 ALTERNATIVA 2	76
4.2.1 MODELO PLANTA DE PRIMER ORDEN CON RETARDO	79
4.2.2 CONTROL PROPORCIONAL- INTEGRAL	80
4.2.3 CONTROL PI POR CURVA DE REACCION	81
5 ASPECTOS LEGALES	85
6 PRESUPUESTO PARA LA IMPLEMENTACION DEL DISEÑO DE LA AUTOMATIZACION DEL PROCESO DE MOLIENDA	87
7. CONCLUSIONES	89
8. RECOMENDACIONES	90
9 BIBLIOGRAFIA	91

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Movimiento de carga en Molino	32
Figura 2. Molino de Barra	33
Figura 3. Parte Interna Molino de Barra	33
Figura 4. Molino Bolas	34
Figura 5. Parte Interna Molino Bolas	34
Figura 6. Partes de un Molino Convencional	36
Figura 7. Partes de molino de Bolas	37
Figura 8. Sistema en Circuito Abierto	38
Figura 9. Sistemas en Circuito Cerrado	38
Figura 10. Hidrociclón	45
Figura 11. Reductor de Velocidad	53
Figura 12. Partes de reductor	53
Figura 13. Partes de Reductor de Piñón	54
Figura 14. Esquema de Transmisión por Correa-Polea	58
Figura 15. Esquema General de reducción por correa-polea	63
Figura 16. Plano Instalación eléctrica	66
Figura 17. Dimensiones Hidrociclón	67
Figura 18. Diámetro Apex vs Flujo Volumétrico	69
Figura 19. Software moly-tools	72
Figura 20. Variables básicas para funcionamiento hidrociclón	74
Figura 21. Opción Automatización 1	76
Figura 22. Opción Automatización 2	77

Figura 23. Diagrama de flujo	78
Figura 24. Diagrama de bloque	79
Figura 25. Curva de Reacción	80
Figura 26. Respuesta de Control PI	81
Figura 27. Modelo de Sistema POR	83
Figura 28. Control PI Z-N	83

TABLAS

	Pag
Tabla 1. Presupuesto global del trabajo de grado	24
Tabla 2. Descripción de los gastos de personal	24
Tabla 3. Descripción de materiales y suministros	25
Tabla 4. Descripción de salidas de campo	25
Tabla 5. Descripción bibliográfica	26
Tabla 6. Descripción de equipos	26
Tabla 7. Descripción de publicaciones	27
Tabla 8. Lista de actividades	28
Tabla 9. Dimensión motor	48
Tabla 10. Factor de servicio	56
Tabla 11. Selección modelo reductor	57
Tabla 12. Comportamiento de los tipos básicos de correa	60
Tabla 13. Dimensión de de partes de hidrociclón	68
Tabla 14. Dimensiones Hidrociclones	69
Tabla 15. Modelos Hidrociclones	71
Tabla 16. Ajuste de Ziegler – Nichols para el controlador	82

LISTA DE ANEXOS

	Pag
Anexo A. CALCULOS MOLY-TOOLS	93
Anexo B. ARTÍCULO DEL PROYECTO	97

GLOSARIO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO: análisis que permite medir la efectividad de las operaciones de conminación de minerales.

BOMBA HIDRÁULICA: bomba impulsada por agua corriente.

CAPACIDAD MINERA INSTALADA: es la máxima cantidad de producción que una mina ha sido diseñada para producir.

DIAGRAMA DE OPERACIONES (BENEFICIO): (Diagrama de flujo). es una representación gráfica de la secuencia de operaciones realizadas durante el procesamiento de un mineral.

MALLA: se refiere al tamaño de abertura de un tamiz, expresado en pulgadas, micrones o mm.

MATERIAL DE ALIMENTACIÓN: masa de roca o partículas minerales que son introducidas a una determinada planta de beneficio para someterla a un proceso determinado.

MATERIAL EN BRUTO: se trata del material que no ha sufrido ningún tipo de beneficio o manufacturación, es decir, es el material tal cual sale de la mina.

MATERIAL PROCESADO: aquellos materiales que han sido sometidos a algún tipo de beneficio.

MOLIENDA: operación de reducción de tamaño de un mineral realizada posteriormente a la trituración; puede ser de tipo primario o secundario según el tamaño requerido del producto.

MOLIENDA AUTÓGENA: proceso de reducción de tamaño llevado a cabo en un cilindro rotatorio en el cual el efecto molidor es causada por la fricción mutua entre las partículas de mineral.

MOLIENDA SEMIAUTÓGENA (SAG): método de molienda de roca y minerales en el cual el medio molidor está compuesto por trozos grandes del mismo material que se intenta moler y bolas de acero.

MOLINO: máquina usada en la molienda de minerales.

MOLINO DE ARRASTRE: un molino que consiste en una o más piedras grandes arrastradas por un lecho circular, que se utiliza para moler minerales.

MOLINO DE BARRAS: molinos para molienda fina (última etapa de molienda en la que el material que se entrega pasa por un tamiz de malla de 1 milímetro cuadrado de sección) similares a los molinos de bolas.

MOLINO DE BOLAS: cilindro metálico cuyas paredes están reforzadas con material fabricado en aleaciones v de acero al manganeso.

MOLINO DE GUIJARROS: molino cilíndrico, similar al molino de barras, con sólo un compartimiento y una carga de partículas de mineral cribadas como medio de molienda. Muy usados en minas de oro de Sudáfrica.

MOLINO DE PISONES: el equipo y la estructura que lo contiene, utilizada para moler material de mena mediante piezas de hierro, piedra o madera, pesadas, que caen constantemente, similares a la acción de pulverización de material con un mortero.

MOLINO SEMIAUTÓGENO: molino de gran capacidad que recibe 111 materiales directamente de la trituradora primaria. El molino tiene en su interior bolas de acero de manera que, cuando el molino gira, el material cae y se va moliendo por efecto del impacto.

MOLTURACIÓN: trituración o molienda

MOTOR DE 6 Y 8 POLOS: Los polos en un motor hacen referencia a la capacidad de RPM que estos pueden generar

PULPA: mezcla de mineral molido o pulverizado con agua o una solución acuosa.

RESUMEN

En la actualidad, la automatización de procesos está presente en el mundo de la industria jugando un papel de vital importancia ya que reporta una serie de sustanciales ventajas tales como el ahorro de tiempo y aumento en la productividad, así como una mayor seguridad en la realización de aquellos procesos en los que se exige una alta precisión.

En este proyecto se realizó el diseño de automatización de la molienda de minerales auro argentíferos con el fin de optimizar esta etapa, fundamental en el proceso de extracción mineralógico del oro. Las variables más importantes en este proceso son la cantidad de material a procesar y la granulometría que se desea obtener para que las siguientes etapas se realicen eficientemente.

Se realizó el cálculo del molino y del hidrociclón para obtener una clasificación con una óptima granulometría del mineral y así obtener una extracción adecuada del oro. Además se analizaron dos alternativas para la reducción de velocidad del motor las cuales se hicieron por el método de correas y reductores de velocidad de piñones.

También se analizaron dos alternativas para el diseño de automatización de la etapa de molienda para obtener una extracción adecuada del mineral. En estas alternativas se tiene en cuenta el valor de la implementación y la eficiencia de cada una de ellas.

Por último se establecieron los costos de los equipos requeridos para poder implementar el diseño de automatización de la etapa de molienda y a la vez analizar su viabilidad y el retorno de la inversión.

ABSTRACT

Actually, the automation of processes is present in the world of industry playing a vital role as it reports a substantial number of advantages such as saving time and increasing productivity, and a greater security in the performance of those processes in which high accuracy is required.

In This project was designed the automation of the mineral grinding mill of auro argentiferous in order to optimize this step, fundamental in the process of mineralogy gold extraction. The most important variables in this process are the amount of material to be processed and the particle size to be obtained for the following stages to run efficiently.

We performed the calculation of the mill and the hydrocyclone to obtain an optimal classification with the mineral size for a proper extraction of gold.

Two alternatives were also analyzed for reducing engine speed which are the method of belts and gears speed reducers.

We also analyzed two alternatives for the automation design of the milling stage for a proper extraction of the mineral. these alternatives takes into account the value of implementation and efficiency of each.

Finally, we determined the costs of the required equipment to implement the automation design of the grinding step and also analyzed the feasibility and return of investment.

INTRODUCCION

El presente proyecto está orientado al diseño de un modelo de automatización para el proceso de molienda de mineral auro argentífero. El tema de automatización dará una visión más amplia de lo que puede ayudar esto al sector minero ya que se va a dar en la misma un proceso más rápido y eficiente.

El objetivo central del diseño de automatización y control del proceso de pulverización de mineral auro argentífero, es obtener como resultado el mejoramiento de la calidad y eficiencia en la etapa de molienda. Para tener una buena eficiencia y producción en la extracción de oro es necesario que la etapa de molienda tenga un control del tamaño (malla) del material de descarga.

Para llevar a cabo este proyecto y darle cumplimiento a los objetivos propuestos se realizó el diseño de automatización de la etapa de molienda con un molino de bolas para una capacidad de 120 ton/h y el cálculo de un hidrociclón que tiene un diámetro de 78cm, un diámetro de vortex de 15.6cm, un diámetro de ápex 5.2cm y un diámetro de alimentación de 11.1cm. Con estos dos equipos se diseñó un circuito cerrado molino – hidrociclón para realizar el proceso de molienda y clasificación del mineral.

En el diseño del molino se calculó el motor necesario para este proceso y se presentaron dos alternativas para la reducción de velocidad del motor, el cual mantiene una velocidad de trabajo constante de 26 RPM para una pulverización óptima del material, para que así el hidrociclón haga una adecuada clasificación del mismo.

También se analizaron dos alternativas de control para el diseño de automatización de la etapa de molienda para obtener una extracción adecuada del mineral. En estas alternativas se tiene en cuenta el valor de la implementación y la eficiencia de cada una de ellas. Al darse una mayor eficiencia en el proceso de pulverización del mineral auro argentífero en la etapa de molienda se lograra que la empresa minera aumente la extracción de este mineral, y por lo tanto esto ayudara a que la empresa mediante la utilización de inversiones tecnológicas aumente sus ganancias.

1. PRESENTACION DEL TRABAJO DE GRADO.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia es un país ubicado en la zona noroccidental de América del Sur, con alrededor de 45 millones de habitantes y es la tercera en población en América Latina, después de Brasil y México. En Colombia la minería ha tenido un importante crecimiento en los últimos años, en el 2006 el área contratada fue de 2.148.046 personas, el 31 de diciembre de 2007 se incrementó en 1.536.802 personas y en la actualidad el área minera contratada es de 392.471 personas.

En Colombia la población minera está dedicada a la extracción de oro artesanal, pocos lo hacen mediante empresas mineras debidamente reglamentadas y certificadas por el gobierno como la frontino en Segovia Antioquia, el zancudo en titiribí Antioquia.

Muchas de estas personas realizan el proceso de pulverización del mineral de manera inapropiada utilizando equipos que no son óptimos, generando así pérdidas en la producción al no extraer un porcentaje adecuado del mineral en este caso el oro, además se trabaja en forma manual, hecho que trae como consecuencia fallas técnicas en el proceso ya que no se tiene la información exacta de la cantidad de material a procesar y la granulometría óptima que se requiere para la extracción del oro lo cual se convierte en una baja eficiencia en la producción.

Para resolver el problema se plantea la automatización del sistema de molienda para llevar a cabo esta automatización se dispone de un molino de bolas, en el cual la roca es molida y pulverizada en partículas mucho más diminutas con la granulometría adecuada. Ya molida la roca se procede a la clasificación del mineral realizada por medio de un hidrociclón el cual se encargara de seleccionar las partículas que se necesitan para una extracción óptima del mineral (oro).¹

¹ Ministerio de Minas y Ambiente, censo minero nacional, [online] Bogotá 2010

Formulación del problema ¿Cómo optimizar el proceso de molienda para la extracción de oro?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Diseñar un modelo de automatización para el proceso de molienda de mineral auro argentífero.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar los equipos y la infraestructura necesaria para la molienda del mineral auro argentífero.
- Dimensionar el molino de bolas y el hidrociclón necesarios para la molienda del mineral auro argentífero de acuerdo con la producción establecida.
- Diseñar un modelo de automatización de circuito de molienda y clasificación utilizando dos alternativas posibles para el proceso de clasificación del material.

1.3 JUSTIFICACION

Con este proyecto se brinda una alternativa de solución a una necesidad real del sector minero, que no cuenta con los equipos para la explotación de minas, además de no contar con una capacitación que les brinde el conocimiento necesario para la explotación. A pesar que es un sector pequeño los mineros artesanales no cuentan con la tecnología y los recursos para implementar procesos automatizados en las minas.

Este diseño le facilita el trabajo a todos los mineros que sacan el mineral pulverizado manualmente por que el proceso cuenta con un circuito cerrado molino – hidrociclón.

Con este diseño de automatización se aumenta la producción, porque se presentan menos fallas en las maquinas, los tiempos en el proceso de pulverización del material serán más exactos, se reducirán los paros de mantenimiento y reparación de los dispositivos. Estando en operación el molino durante todo el periodo de trabajo.

Utilizando los medios y equipos existentes, adaptándolos a las necesidades y exigencias específicas de la mina se realiza un control para el proceso de molienda que permita obtener un tamaño adecuado del mineral para así tener una extracción eficiente.

1.4 DISEÑO METODOLÓGICO

1.4.1 Modalidad del trabajo de grado

➤ Tipo de proyecto

Este es un proyecto de desarrollo tecnológico de enfoque cuantitativo, ya que en este se realizaran mediciones y cálculos, para así escoger los equipos más óptimos al realizar el diseño, el levantamiento de los planos.

El tipo de investigación a realizar será de tipo descriptivo, ya que el objetivo de esta es realizar una descripción, análisis y una interpretación de los procesos de molienda de un mineral aurífero para así poder dar solución al problema planteado.

1.4.2 Estrategias metodológicas. Las estrategias metodológicas que se utilizaron en el desarrollo del presente proyecto, fueron:

➤ Revisión documental.

Esta estrategia consiste en estudiar y aplicar el reglamento técnico del sector de minas, propuesto por los Ministerios minas , Ambiente y Desarrollo de la República de Colombia; y así mismo la exploración de los distintos proyectos realizados en este campo por Universidades y empresas dedicadas a soluciones de automatización. Se busca recolectar y analizar la mayor información posible cuya utilidad este directamente relaciona con los objetivos propuestos en este proyecto, para posteriormente tratarla y adaptarla a las necesidades del mismo.

➤ Salidas de campo

Se realizó una visita a la mina trinidad, para conocer la infraestructura, los equipos y maquinarias que utilizan. La mina visitada se encuentra en el municipio de Nechi (Antioquia), también se hizo una visita al laboratorio de metalurgia CIMEX de la Universidad Nacional y así realizar un diagnóstico de las condiciones actuales del proceso, en estas se tomaron fotografías con todos los detalles posibles para así obtener una documentación gráfica de esta y luego con el diagnóstico y la información fotográfica se realizó un levantamiento de planos del proceso y posteriormente realizar el diseño.

➤ Diseño del sistema de automatización para el proceso de molienda

Selección de la instrumentación y equipos necesarios para la automatización:
Se analizaron cuáles son los elementos que deben hacer parte del sistema de automatización teniendo en cuenta aspectos de calidad y seguridad. Se sometió a una evaluación para determinar el grado de automatización mínimo necesario del proceso de acuerdo a sus necesidades actuales y/o futuras.

➤ Levantamiento de planos

En esta etapa se realizó el levantamiento de los planos del proceso de molienda y posteriormente sobre estos se realizó el diseño de los planos eléctricos y de instrumentación para el proceso de molienda de la roca.

➤ Presentación del producto final

Se elaboró un proyecto de investigación en el cual se entregaran los requerimientos y condiciones necesarias para el proceso de molienda; y también se realizó el levantamiento de los planos de instrumentación y control para la implementación del sistema.

1.5 PRESUPUESTO

El presupuesto total del proyecto se presenta en las siguientes tablas, siendo la primera de ellas, la Tabla 1, el presupuesto global y las siguientes, las especificaciones de este presupuesto.

Tabla 1. Presupuesto global del trabajo.

PRESUPUESTO GLOBAL DEL TRABAJO DE GRADO				
RUBROS	FUENTES			TOTAL
	Estudiantes	IUE	Externa	
Personal	\$ 3.000.000	\$1.755.000	\$ 960.000	\$ 5.715.000
Material y suministros	\$ 855.000	\$ 0	\$ 0	\$ 855.000
Salidas de campo	\$ 1.500.000	\$ 0	\$ 0	\$ 1.500.000
Bibliografía	\$ 380.000	\$ 220.000	\$ 0	\$ 600.000
Equipos	\$ 2.690.900	\$ 0	\$ 0	\$ 2.690.900
Publicaciones	\$ 150.000	\$ 0	\$ 0	\$ 150.000
TOTAL	\$ 8.575.900	\$ 1.975.000	\$ 960.000	\$ 11.510.900
IMPREVISTOS	10 %			\$ 1.151.090
GRAN TOTAL				\$ 12.661.990

Tabla 2. Descripción de los gastos de personal.

DESCRIPCIÓN DE LOS GASTOS DE PERSONAL						
Nombre de Estudiantes	FUNCIÓN en el trabajo	DEDICACIÓN horas/semana	FUENTES			TOTAL
			Estudiantes	IUE	Externa	
Estudiantes	Diseño	20 horas/sem	\$ 3.000.000	\$ 900.000	\$ 0	\$ 3.900.000
Profesor	Asesor	32 horas/sem	\$ 0	\$ 855.000	\$ 0	\$ 855.000
Minero	Asesor	3 horas/sem	\$ 0	\$ 0	\$ 960.000	\$ 960.000
TOTAL			\$ 3.000.000	\$ 1.755.000	\$ 960.000	\$ 5.715.000

Tabla 3. Descripción de materiales y suministros.

DESCRIPCIÓN DEL MATERIALES Y SUMINISTROS				
Material	FUENTES			TOTAL
	Estudiantes	IUE	Externa	
Papelería	\$ 400.000	\$ 0	\$ 0	\$ 400.000
Cartucho de tinta	\$ 455.000	\$ 0	\$ 0	\$ 455.000
TOTAL	\$ 855.000	\$ 0	\$ 0	\$ 855.000

Tabla 4. Descripción de las salidas de campo

DESCRIPCIÓN DE LAS SALIDAS DE CAMPO				
DESCRIPCIÓN DE LAS SALIDAS DE CAMPO	FUENTES			TOTAL
	Estudiantes	IUE	Externa	
Viaje de Visita a la mina de Segovia	\$ 980.000	\$ 0	\$ 0	\$ 980.000
Visita a otras minas	\$ 520.000	\$ 0	\$ 0	\$ 520.000
TOTAL	\$1500.000	\$ 0	\$ 0	\$ 1.500.000

Tabla 5. Descripción bibliografía.

DESCRIPCIÓN BIBLIOGRAFIA				
DESCRIPCIÓN BIBLIOGRAFIA	FUENTES			TOTAL
	Estudiantes	IUE	Externa	
Libros	\$ 140.000	\$ 170.000	\$ 0	\$ 310.000
Internet	\$ 240.000	\$ 50.000	\$ 0	\$ 290.000
TOTAL	\$ 380.000	\$ 220.000	\$ 0	\$ 600.000

Tabla 6. Descripción equipos.

DESCRIPCIÓN EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN EQUIPOS	FUENTES			TOTAL
	Estudiantes	IUE	Externa	
Computador	\$ 1.600.000	\$ 0	\$ 0	\$ 1.600.000
Impresora	\$ 270.000	\$ 0	\$ 0	\$ 270.000
Cámara digital	\$ 399.900	\$ 0	\$ 0	\$ 399.900
TOTAL	\$ 2.690.900	\$ 0	\$ 0	\$ 2.690.900

Tabla 7. Descripción publicaciones.

DESCRIPCIÓN PUBLICACIONES				
DESCRIPCIÓN PUBLICACIONES	FUENTES			TOTAL
	Estudiantes	IUE	Externa	
Impresión y empastado del Trab	\$ 100.000	\$ 0	\$ 0	\$ 100.000
Fotocopias	\$ 50.000	\$ 0	\$ 0	\$ 50.000
TOTAL	\$ 150.000	\$ 0	\$ 0	\$ 150.000

2. DETERMINACION DE EQUIPOS E INFRAESTRUCTURA PARA EL PROCESO DE MOLIENDA DEL MINERAL AURO ARGENTIFERO.

Para determinar los equipos, tanto de instrumentación como de infraestructura para el modelo de automatización de una planta de molienda del mineral auro argentífero, es necesario conocer en primera instancia el proceso de molienda y el tipo de molino más adecuado a utilizarse en el proceso.

2.1 ELEMENTOS CONCEPTUALES PARA EL PROCESO DE MOLIENDA DEL MINERAL AURO ARGENTÍFERO

2.1.1 Molienda. Luego de triturado el mineral es introducido en varios molinos de bolas, el cual contiene unas bolas de hierro en su interior que se encargan de pulverizar las piedras de mineral durante una hora y media aproximadamente, obteniendo así, mineral pulverizado para posteriormente ser transportado a la zona de aglomeración. En esta etapa se debe liberar completamente las partes valiosas del mineral de la parte estéril (mineral no benéfico que contiene la roca), antes de proceder a la siguiente etapa. La operación de Molienda normalmente se efectúa en etapa primaria en los molinos de barras y secundaria en los de bolas. Generalmente la descarga de los molinos de barras es a 991 micras (16 mallas). Esta operación se logra con alta eficiencia cuando los molinos son operados en condiciones normales en cuanto a uniformidad del tamaño de alimentación, dilución y si satisfacen además las siguientes constantes: velocidad crítica y velocidad de trabajo, carga de bolas y potencia del motor. Las velocidades del sistema son calculadas mediante las ecuaciones 1 y 2²:

$$v_c = \frac{76.62}{\sqrt{D}} \quad \text{ec. 1}$$

$$v_t = 0.75v_c \quad \text{ec. 2}$$

Dónde:

D: diámetro del molino por el interior del revestimiento en pies.

² CADAVID VELEZ, Carlos. GOMEZ VELASQUEZ, Luis. Diseño de un molino de bolas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín 1983.

vc: velocidad crítica en R.P.M (revoluciones por minuto)
vt: velocidad de trabajo

La velocidad crítica es la velocidad mínima a la cual los medios de molienda y la carga centrifugan, es decir, no tienen un movimiento relativo entre sí. Cuanto más fino se muele el mineral, mayor es el costo de molienda y hasta cierto grado, una molienda fina conlleva a una mejora en la recuperación de valores.

La eficiencia del proceso de molienda depende en gran medida de una serie de factores como:

- a. Distribución de tamaños en la alimentación del mineral.
- b. Velocidad y tamaño del molino.
- c. Tamaño del cuerpo moledor.
- d. Diseño de los revestimientos del molino.
- e. Cambios en las características del mineral.
- f. Distribución de tamaños del producto del molino.
- g. Volumen de carga moledora y su distribución de tamaño.
- h. Eficiencia de la clasificación.

- Propósito de la molienda. El propósito de la molienda difiere con el material a moler; en plantas mineras el propósito esencial es fragmentar suficientemente el mineral con el fin de obtener el material valioso contenido en dicho mineral. Por otra parte es también necesario reducir el tamaño del material molido suficientemente con el fin de garantizar el movimiento diferencial del mineral en el proceso posterior de flotación.

2.1.2 Etapas de la molienda. En las plantas de molienda hay diferentes etapas para la liberación del mineral valioso y estas son: Molienda primaria en la cual se utilizan molinos de barras, Molienda secundaria y Molienda terciaria utiliza bolas de acero como medio de molienda y se denominan "MOLINOS DE BOLAS"; Las razones de reducción son más altas en molinos que en trituradoras. En efecto, en los molinos primarios son del orden de 5:1; mientras que en molinos secundarios y terciarios aumenta a valores de hasta 30:1. Los Molinos son cilindros rotatorios horizontales forrados interiormente con material resistente, cargados en unos 50% de su volumen con barras de acero, bolas de acero o trozos de roca. Dentro de esta masa rotatoria, se alimenta continuamente el mineral fresco proveniente de la etapa de trituración, la carga de retorno o carga circulante del clasificador (u/f) y agua suficiente para formar la masa de mineral de una plasticidad adecuada, de manera que la mezcla fluya bajo una ligera cabeza hidráulica, hacia el extremo de descarga del molino³.

³ Alejandro Chávez, Aplicaciones de molienda fina, [online] Perú 2011

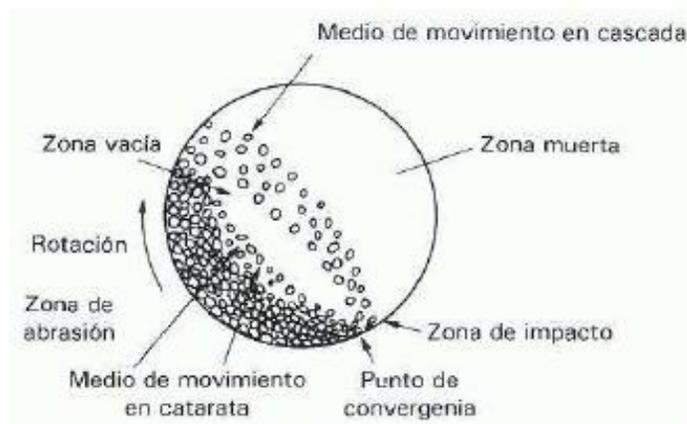
2.1.3 Mecanismo de molienda. Los molinos de bolas tienen una gran variabilidad en las condiciones de funcionamiento, varían en tamaño, proporciones, forma de la cubierta. Los cuerpos moledores difieren en cuanto a forma, tamaño, peso individual y total, dureza; el movimiento de la carga moledora, determinado por su forma, por la configuración de la cubierta y por el diámetro y velocidad del molino varía con un cambio en los factores descritos anteriormente. El análisis del funcionamiento de un molino. El movimiento de los cuerpos moledores en un cilindro en rotación comprende dos variedades diferentes las cuales son:

- Rotación de los cuerpos moledores alrededor de su propio eje situados paralelamente al eje del molino.
- Cascada. movimiento de rodadura sobre la superficie de la carga y/o catarata, caída libre parabólica de los cuerpos moledores sobre la carga.

Cuando el molino se pone en movimiento, los cuerpos moledores ascienden por el lado que sube del tambor hasta que la masa adquiere una posición de equilibrio dinámico, en la que los cuerpos que están en contacto con la pared del tambor o en las capas próximas a esta se muevan en la dirección del tambor, mientras las que se encuentran en las capas más alejadas de la pared lo realizan en sentido opuesto. El resultado es el movimiento general rotatorio de la masa alrededor de un núcleo horizontal semi estacionario, como se puede observar en la figura 1. ⁴

⁴ CADAVID VELEZ, Carlos. GOMEZ VELASQUEZ, Luis. Diseño de un molino de bolas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín 1983.

Figura 1. Movimiento de la Carga en un Molino Horizontal



Fuente: Deuman Limitada, Guía de Asistencia Técnica de tratamientos de Materiales Chancado, Molienda, Agitación y Secado, [online] Santiago de Chile 2011.P.55

2.2 TIPOS DE MOLINOS CILÍNDRICOS

2.2.1 Molinos de barras. Se utilizan generalmente para molienda primaria. Aceptan alimentos tan grandes como 2" y producen descargas constituidas por arenas que pasan generalmente la malla 4. La molienda es producida por barras que originan frotamiento o impacto sobre el mineral, el cual, por su mayor tamaño en la alimentación respecto a la carga, origina que las barras ejerzan una acción de tijeras, produciendo molienda por impacto en las zonas cercanas a la entrada y por fricción en las cercanías de la descarga.

Las dimensiones de los molinos de barras, deben tener una relación Longitud/ Diámetro entre 1.3 a 2.0 y nunca menor a 1.25, de este modo se evita que las barras puedan enredarse. En la figura 2 y figura 3 se observa un molino de barra.

Figura 2. Molino de Barras



Fuente: Crusher, Molinos de Bolas y Barras Para Minería, [online] Lima Perú 2011

Figura 3. Parte interna molino de barras



Fuente: Hotfrog, Molinos y Trituradores, [online] Rodrigo de Araya Santiago de Chile 2010

2.2.2 Molino de bolas. Trabajan en circuito cerrado con un clasificador aunque pueden igualmente operar en circuito abierto; La molienda en circuito cerrado disminuye el tiempo de residencia de las partículas en cada paso por el molino y también la proporción de material fino en el molino, comparado con molienda en circuito abierto. El tamaño de la alimentación que pueden recibir es variable y depende de la dureza del mineral. Los productos igualmente dependerán de las condiciones de operación y pueden ser tan gruesos como de malla 35 o tan finos que se encuentran en un 100% por debajo de la malla 325 con radios de reducción de 30 o mayores. Los molinos de bolas se cargan normalmente entre el 40 al 45% de su volumen. Los principales tipos de molinos de bolas son los

molinos de descarga por rebalse y molinos de descarga por parrilla. En la figura 4 se puede observar un molino de bolas⁵.

Figura 4. Molino de Bolas



Fuente: Zenith, Molino de Bolas, [online], Shanghai 2010

Figura 5. Parte interna molino de bolas



Fuente: Direct Industry, Molino de Bolas, [online] France 2010

2.2.3 Molinos autógenos. Pertenecen a este tipo, los molinos que reducen de tamaño utilizando como medio de molienda el material grueso del mismo mineral. El molino utiliza adicionalmente una pequeña proporción de carga de bolas, se denomina semi-autógeno, este se distinguen porque tiene un gran diámetro y una pequeña longitud.

⁵ Shanghai Zenith Company, Molino de bolas, [online] China 2010

2.3 VARIABLES OPERATIVAS DE LOS MOLINOS. Se denominan variables o parámetros de operación a todo lo que se puede controlar; existen muchas en molienda, los más importantes son:

a. Carga de Mineral. La alimentación de carga del mineral debe ser constante y uniforme. Normalmente los molinos trabajan con 70% a 78% de sólidos, dependiendo del peso específico del mineral, la cantidad de mineral que se puede cargar en un molino de bolas oscila de 0.45 toneladas por metro cubico de capacidad.

b. Suministro de Agua. La alimentación de agua a los molinos se controla mediante la densidad de pulpa en la descarga del mismo. Cuando el mineral y el agua ingresan al molino, en su interior, forman un barro liviano que tiene tendencia de pegarse a las bolas, por otro lado el agua ayuda a avanzar a la carga en el interior del molino.

c. Carga de medios de molienda. Los medios de molienda usados son las barras y las bolas. Las barras son de acero fundido y/o aleado; las bolas son de acero forjado o fundido. Es necesario que el molino siempre tenga su carga normal de medios moledores.

d. Tiempo de Molienda. La permanencia del mineral dentro del molino determina el grado de finura de las partículas liberadas. El tiempo de permanencia se regula por medio de la cantidad de agua añadida al molino; el tiempo será mayor cuando ingresa al molino menor cantidad de agua y será menor cuando ingresa al molino mayor cantidad de agua.

e. Velocidad de Operación de los Molinos. La velocidad de operación de un molino (V_o), se especifica por un porcentaje obtenido al relacionar la velocidad angular N del molino en RPM con la velocidad crítica del molino (V_c), también en RPS como se indican en las ecuaciones 1 y 2 propuestas anteriormente. La velocidad de operación (V_o) del molino, se encuentra generalmente entre el 60% a 80% de la velocidad crítica, rango en el que produce la mayor energía cinética de la bola o barra durante el impacto.

f. Carga Circulante. El tonelaje de material grueso que retorna al molino, es definido como carga circulante. La determinación de la carga circulante de un circuito cerrado de molienda se efectúa por varios métodos:

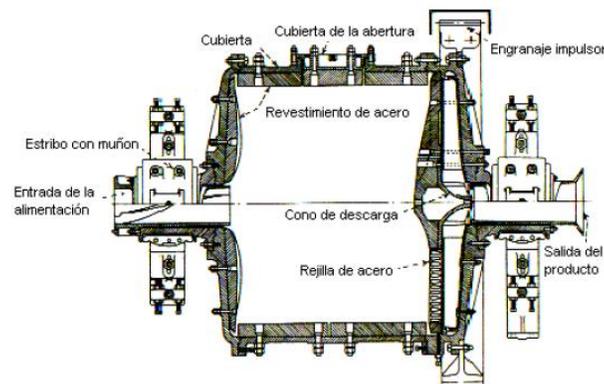
- En función de las densidades de pulpa.
- En función de porcentajes de sólidos.

- En función del análisis granulométrico de los principales productos del circuito.

2.4 DESCRIPCIÓN DEL MOLINO DE BOLAS

El Molino de bolas es una herramienta eficiente para la pulverización de muchos materiales en polvo fino. Este es usado para moler o seleccionar muchos minerales y otros materiales, es ampliamente usado para la minería, materiales de construcción e industria química. Cuenta con dos tipos de pulverización: el proceso en vía seca y el proceso en vía húmeda. En la parte interna del molino de bolas se da el desplazamiento de las partículas bajo la presión aplicada provocando la pulverización por fricción, mecanismo dominante en este proceso de reducción de tamaños. La capa granular comprimida tiene una influencia amortiguadora, que reduce la efectividad de la molienda y disminuye drásticamente la velocidad de desgaste de los elementos moledores, en la figura 6 se puede observar las partes de un molino de bolas.⁶

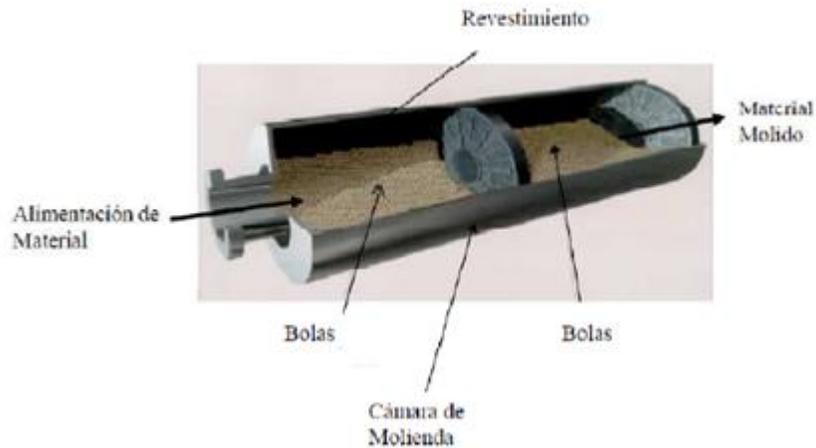
Figura 6. Partes de un Molino convencional



Fuente: Juan Ramón Alcántara Valladares, Diseño practico de un molino de bolas, [online] México, D.F. 2008.P.6

⁶ Mining and construction machinery, Molino de bolas, [online], shanghai china, 2010

Figura 7. Partes de un Molino de Bolas



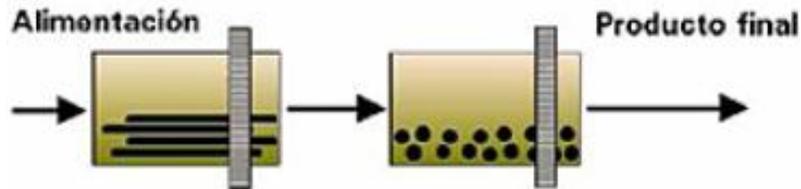
Fuente: Deuman Limitada, Guía de Asistencia Técnica de tratamientos de Materiales Chancado, Molienda, Agitación y Secado, [online] Santiago de Chile 2011.P.60

2.5 OPERACIÓN DE MOLINOS DE BOLA

2.5.1 Operación en Circuito Abierto. La molienda en circuito abierto puede llamarse también molienda con pasada simple del material, es decir cuando todo el material es molido hasta la finura deseada en un solo recorrido por el molino, tal como se ve en la figura 8. El molino no solo muele el material sino que lo reduce a un tamaño determinado, descargándolo solo cuando satisfaga los requisitos del producto terminado. La cantidad de material que entra al molino debe ser igual a la que salga porque un exceso de carga produce que la molienda sea muy gruesa y el material resulte más fino de lo necesario.

Figura 8. Sistema en circuito abierto

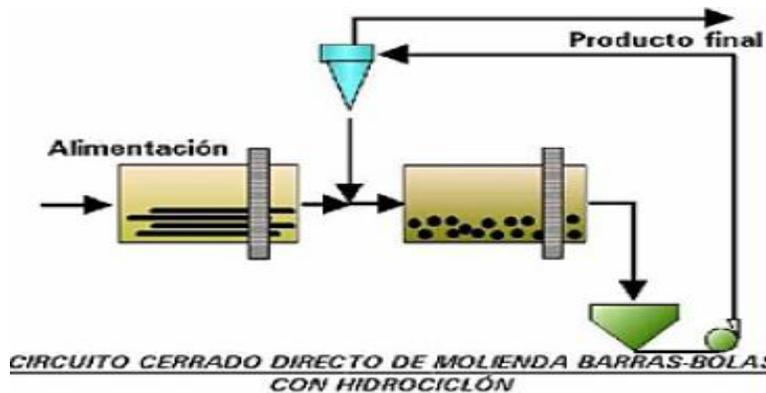
CIRCUITO ABIERTO DE MOLIENDA BARRAS-BOLAS



Fuente: Escuela Técnica superior de ingenieros de mina, Circuito de molienda, [online] Madrid 2010

2.5.2 Operación en circuito cerrado. Con este método se incrementa el rendimiento del molino, acoplado a este un clasificador, el cual trabaja en circuito cerrado con el molino como se muestra en la figura 9. El tamaño deseado no deberá obtenerse en una sola pasada. En el clasificador se generan dos corrientes de materiales, una fina con el tamaño adecuado para la etapa siguiente y una gruesa la cual regresa al molino por no tener el tamaño requerido.⁷

Figura 9. Sistema en circuito cerrado



Fuente: Escuela Técnica superior de ingenieros de mina, Circuito de molienda, [on line] Madrid 2010

⁷ Alipso, Molienda, [online] Chile 2009

2.5.3 Operación de molienda en vía seca. La operación de molienda en vía seca es muy resistente al flujo debido a su fricción interna. Las cargas de bolas suben más cuando se trabaja en seco que cuando se trabaja en húmedo, por esta razón los molinos de bolas se trabajan a más baja velocidad periférica en seco que en húmedo.

2.5.4 Operación de molienda en vía húmeda. Con la molienda en vía húmeda se incrementa la eficiencia con respecto a la molienda en seco, esta consiste en agregar agua tanto al material que entra al molino proveniente del clasificador o de una nueva alimentación como al material que está dentro del molino, a esta mezcla de material y agua se le llama pulpa. El agua asegura el paso rápido del material por el molino y facilita la descarga. Una pulpa apropiada es la de 67% de solido por peso.

2.6 TEORÍAS DE TRITURACIÓN

Para relacionar la energía consumida en la molienda y el grado de la reducción de tamaño de las partículas se plantean algunas teorías de trituración, estas son:

2.6.1 Teoría de rittinger. La energía consumida en un proceso de reducción de tamaño es proporcional a la cantidad de nueva superficie producida como se indica en las ecuaciones 3 y 4.⁸

$$E = cr * \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad \text{ec. 3}$$

$$E = cr * (s_2 - s_1) \quad \text{ec. 4}$$

⁸CADAVID VELEZ, Carlos. GOMEZ VELASQUEZ, Luis. Diseño de un molino de bolas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín 1983.

De donde:

E:	Energía	consumida	por	unidad	de	masa
X1:	Diámetro	inicial	de	la		partícula.
X2:	diámetro	final	de	la		partícula.
s1:	superficie		especifica			inicial.
s2:	superficie		especifica			final.
cr:	constante de rittinger.					

2.6.2 Teoría de bond. Esta teoría se basó en el análisis de gran cantidad de datos realizados por Bond. Esta propone que la energía consumida es proporcional a la longitud de las nuevas fracturas producidas como se indica en las ecuaciones 5 y 6.

$$E = 2 * cb * \left(\frac{1}{\sqrt{x2}} - \frac{1}{\sqrt{x1}} \right) \quad \text{ec. 5}$$

$$E = wi * \left(\frac{10}{\sqrt{x2}} - \frac{10}{\sqrt{x1}} \right) \quad \text{ec. 6}$$

De donde:

Cb: constante de bond.

Wi: índice de trabajo de bond, el cual representa el trabajo requerido para reducir el material desde un tamaño infinito hasta un tamaño tal que el 80% pase por un agujero de 100 micras. x1 y x2 se encuentran en micrones y wi en Kw/h por tonelada.⁹

2.7 ANTECEDENTE DE AUTOMATIZACIÓN Y MEJORAMIENTO EN EL PROCESO DE MOLIENDA DEL MATERIAL AURO ARGENTÍFERO

Los antecedentes nos sirven como referencia, para indicar el rumbo que tomará nuestra investigación.

⁹ CADAVID VELEZ, Carlos. GOMEZ VELASQUEZ, Luis. Diseño de un molino de bolas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín 1983.

2.7.1 Proceso de molienda flotación delta. El objetivo de este proyecto fue optimizar la planta de Molienda y flotación de mineral sulfurado de oro, efectuando un circuito con una capacidad para beneficiar 10.500 t/mes, paralelo al circuito existente, el cual alcanzará un total de Planta Delta de 75.000 ton/mes.

Los equipos actualmente instalados en la Planta Ovalle y Planta Vallenar que se trasladarían a Delta para obtener 10.500 ton/mes de capacidad adicional corresponden a los siguientes:

- ◆ Molino 9 x 9 de la planta Vallenar
- ◆ Bomba de molino Westinhouse
- ◆ Bombas de lubricación de Alta y baja
- ◆ Vibrador de Cal, de alimentación
- ◆ Pesómetro en serie
- ◆ 12 celdas de flotación de 150 pie³.
- ◆ Bombas dosificadoras de reactivo
- ◆ Equipos complementarios y de apoyo al proceso

El mineral fresco aportado por la mina y el poder de compra de ENAMI es triturado, muestreados en las instalaciones actuales y será incorporado al proyecto junto al stock de mineral existente en la planta, realizando el traspaso con cargador frontal o camiones se incorporan a la tolva de recepción del proceso. El material, de tamaño 1/4" aproximadamente, se traspasará por medio de una correa transportadora directamente a la unidad de molienda del proceso. La operación de molienda húmeda se realiza en un molino de bolas de 24 R.P.M de 9 x 9 ft. El producto de la molienda alimenta gravitacionalmente a los bancos de celdas de Flotación desde donde es muestreado para control y balance metalúrgico de la planta.¹⁰

2.7.2 Sistemas de control optimizante para plantas de molienda semiautógena. El objetivo central del proyecto es desarrollar un nuevo sistema de control de planta, desde una base conceptual que integra el movimiento, composición y reología de la carga a la información tradicional, usando señales entregadas por instrumentación de última generación para molinos semiautógenos (Impactómetro, Sag-Analyzer) y ampliando la instrumentación disponible en molinos de bolas de gran tamaño para incorporar esta información.

Los desarrollos propuestos incluyen un analizador de carga interna para molinos de bolas y un sistema para monitorear las características de la pulpa en los flujos del circuito de molienda. Se espera en general desarrollar esquemas de control más robustos para la operación global de plantas de molienda semiautógena.

¹⁰ Esea, expediente Principal, [online], Washington 2004

Complementariamente, se plantea desarrollar herramientas de apoyo a la operación de plantas de molienda semiautógena (simulador de movimiento de carga por elementos discretos de mayor potencial que el actualmente comercializado en Internet (USA), y simulador dinámico del proceso de una planta de molienda semiautógena), con fines de entrenamiento y diseño.

El último objetivo fue aumentar la capacidad de procesamiento y la eficiencia de plantas de molienda semiautógena en su conjunto. El desarrollo del proyecto se hizo en torno a la Planta de Molienda de Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi en Iquique, que es una de las más modernas del mundo y que actualmente cuenta con dos molinos semiautógenos de 32 pies de diámetro, 10.000 HP, dos molinos de bolas de 22 x 36 pies, 13.000 HP, y 35.000 tmd de capacidad de proceso cada uno.¹¹

2.7.3 Instalación de circuito molienda flotación planta industrial universidad de atacama. El objetivo de este proyecto fue aumentar la capacidad de tratamiento de la planta de beneficio de la universidad de atacama a 100 ton/día de mineral sulfurado de cobre, se procedió a realizar un estudio técnico a nivel de laboratorio que contemplo las etapas de molienda y flotación. A través de pruebas de flotación batch, se optimizaron las variables en el proceso y se simulo la operación en circuito cerrado utilizando la técnica de los Split-factor.

Con esta información se procede a realiza los balances de masas respectivos para producir 0.250 ton/h de concentrado, lo que permitió diseñar y seleccionar los equipos correspondientes, los cuales son:

- Triturador de cono de 2'
- Molino de bolas de 6'x5'
- Hidrociclón de 10"
- Celdas convencionales de flotación, por etapas rougher, cleaner, recleaner, scavenger.¹²

¹¹ Comisión nacional de investigación científica y tecnológica , Sistemas de control optimizante para plantas de molienda semiautógena [online]Chile 2002

¹² Solís Z., Cecilia. Instalación de circuito molienda flotación planta industrial universidad de atacama, [online] Santiago de chile 1993

2.8 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control está compuesto por los siguientes elementos básicos:

- Variable de entrada. Señal generada por un instrumento de medición o sensor al realizar una medición; y puede ser mecánica, neumática, electrónica, etc., que se lleva como entrada a un controlador.
- Variable de salida. Es la señal generada por el elemento controlador que se lleva a un elemento final de control, para que realice la acción más adecuada de acuerdo con parámetros deseados, almacenados en el software del equipo.
- Medición o realimentación. Es el medio de enlace entre el proceso y los circuitos de control. Es un sensor o instrumento de medición que al realizar una medición a una variable genera una salida de igual naturaleza o de otro tipo a través de un elemento transductor.
- Controlador o actuador. Equipo que recibe la señal de entrada y de acuerdo a las instrucciones previamente almacenadas, procesa y genera una señal de control, que a través de un elemento final de control que puede ser una válvula o un motor que mantiene la variable de un proceso en unas condiciones deseadas.

Este elemento puede ser un controlador análogo o digital, una tarjeta de adquisición, un PLC entre otros. Para este proyecto se determinó el PLC como elemento controlador, ya que este es el más adecuado para ambientes industriales.

- PLC. Es un equipo electrónico, programable en lenguaje no informático, diseñado para controlar en tiempo real y en ambiente de tipo industrial, procesos secuenciales. Un PLC trabaja con la información recibida de los sensores y el programa lógico interno, actuando sobre los accionadores de la instalación; se da en procesos de producción, procesos secuenciales¹³.

¹³ GARCIA, Antonio .PLC, [online] Montana Estados Unidos 2005. Pág. 1-3

2.9 HIDROCICLÓN

El hidrociclón es un clasificador diseñado para ser utilizado en cabezales de filtración, tanto para aplicaciones en la minería, como en agrícolas, y en la industria. Su función es la de separar la arena y otras partículas compactas más pesadas que el agua. Los Hidrociclones son un elemento indispensable en las instalaciones de extracción y procesamiento de áridos.

- ◆ Clasificación de sólidos en el rango de 10-300 micras, especialmente en circuitos de molienda.
- ◆ Espesado de pulpas previo a las etapas de concentración y separación de sólido - líquido.
- ◆ Clarificación parcial de efluentes como ayuda a clarificadores.
- ◆ Circuitos de lavado en contra corriente.

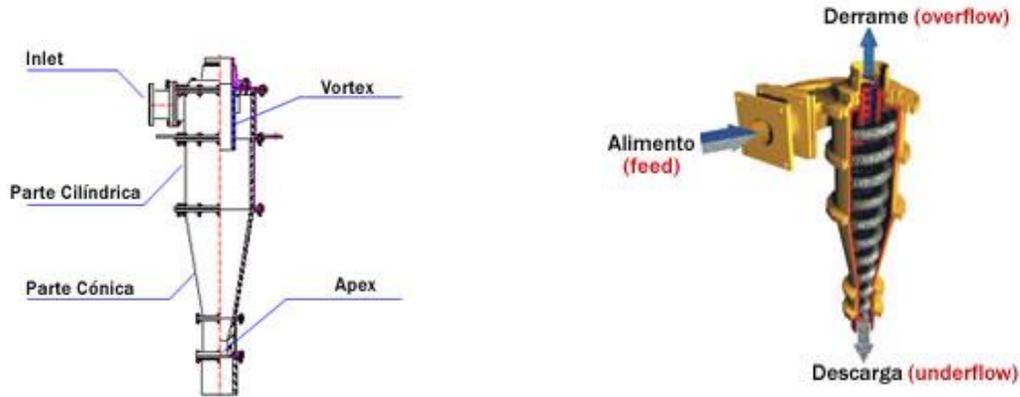
El hidrociclón consiste de una parte cónica seguida por una cámara cilíndrica, en la cual existe una entrada tangencial para introducir la alimentación (Feed). La parte superior del hidrociclón presenta un tubo para la salida de la suspensión diluida (overflow) y en la parte inferior existe un orificio de salida de la suspensión concentrada (underflow). El ducto de alimentación se denomina inlet, el tubo de salida de la suspensión diluida se denomina vortex, y el orificio de salida del concentrado se denomina apex, como se indica en la figura 10.¹⁴

La pulpa de alimentación entra tangencialmente a la parte cilíndrica bajo una cierta presión, lo que genera su rotación alrededor del eje longitudinal del hidrociclón, formando un torbellino descendente hacia el vértice de la parte cónica. Las partículas más gruesas debido a la aceleración centrífuga giran cercanas a la pared, siendo evacuadas a través de la boquilla en forma de pulpa espesa (underflow). Debido a las reducidas dimensiones de ésta, solamente se evacua una parte de la suspensión, creándose en el vértice del cono un segundo torbellino de trayectoria ascendente, el cual transporta las partículas finas junta con la mayor parte del líquido, abandonando el hidrociclón a través de un tubo central situado en la tapa superior del cuerpo cilíndrico (overflow). Regulando la aceleración del torbellino y variando la geometría y toberas del hidrociclón puede ajustarse el tamaño de separación entre 10 y 500 micras.¹⁵

¹⁴ Cuevas. J., Torres F. Diseño de Hidrociclón. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2010

¹⁵ Cribacero, hidrociclones, [online] united kingdom Europa 2011

Figura 10. Hidrociclón



Fuente: ALNICOL SA del Perú, HIDROCICLONES, [online] Callao Perú 2009

En la figura 10 se pueden apreciar las variables a tratar para el diseño del hidrociclón, las cuales son feed, overflow y underflow.

- Feed. Es por donde el material pulverizado que viene del molino de bolas ingresa al hidrociclón.
- Overflow. Arrastra los elementos más finos y/o menos densos, es decir, es por donde se expulsa el material con el tamaño de malla deseado.
- Underflow. contiene los elementos más grandes y/o más densos, los cuales por su peso no son capaces de expulsarse por el overflow, estos materiales son realimentados al proceso de pulverización nuevamente.

3 ESPECIFICACIONES Y CRITERIOS DE DISEÑO DEL MOLINO E HIDROCICLÓN.

3.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

Diseñar implica conocer criterios de diseño como presentación, producción, significación, socialización, presupuesto, mercadeo, entre otros.

Diseñar requiere principalmente consideraciones funcionales y estéticas. Esto necesita de numerosas fases de investigación, análisis, modelado, ajustes y adaptaciones previas a la producción definitiva del proyecto. Además comprende multitud de disciplinas y oficios dependiendo del objeto a diseñar y de la participación en el proceso de una o varias personas.

- Tamaño del molino. Se diseñó un molino de bolas con las siguientes características 5' x 10' (diámetro: 5 pies y largo: 10 pies), el cual tiene la capacidad de procesar 120 ton/día. Para operación en vía húmeda, en circuito cerrado utilizando un clasificador (hidrociclón).
- Tamaño del material de alimentación. El material que ingresa al molino de bolas proviene de la etapa de trituración, con un tamaño menor o igual a 25 mm (0.9842 pulgadas).
- Tamaño del material de descarga (salida). El material de descarga que se obtendrá a la salida molino tendrá un tamaño entre 0.074mm (0.002913 pulgadas) y 0.4 mm (0.01574 pulgadas).

El óptimo llenado del molino depende del tipo de molienda que se lleva a cabo y la potencia invertida en el proceso. Normalmente el volumen ocupado por material procesado con respecto al total del molino representa entre un 20% y un 25%. Carga siendo procesada en términos de altura de llenado. Dependiendo del proceso realizado, se llena entre 45% y 50% del molino, este volumen contempla tanto el material procesado como las bolas del molino.

3.2 CRITERIOS DE DISEÑO

3.2.1 Tamaño y peso del molino. El molino de bolas tendrá un peso de 12.8 toneladas (sin incluir el peso del motor a utilizar y el de los cuerpos moledores "bolas") y las dimensiones de este son D x L 1200 x 3000 mm de la

XINGUANG, este tendrá un velocidad de rotación de 36 RPM, la carga de los cuerpos molidores será de 3.5 toneladas y tendrá un consumo de potencia de 37 kw.¹⁶

3.2.2 Fuente motriz y eléctrica. Como se dispone de energía eléctrica se utilizara como fuente motriz un motor eléctrico, con velocidad de 1200 RPM y de 37kw (50hp).

- Características del motor de 50 hp para el molino de bolas

Totalmente cerrado con ventilación exterior

Marca: Siemens

Velocidad: 1200 RPM

Tensión: 220/240 V a 60 Hz

Tamaño de armazón: 365T NEMA

Modelo: 1LA03656SE71 RGZESD Servicio pesado

Montaje: Horizontal (F1)

Aislamiento: Clase F

Dimensiones: Ver tabla 9.

Diseño Nema B según Norma MG-1

33°C temperatura ambiente a una altitud de 2300msnm

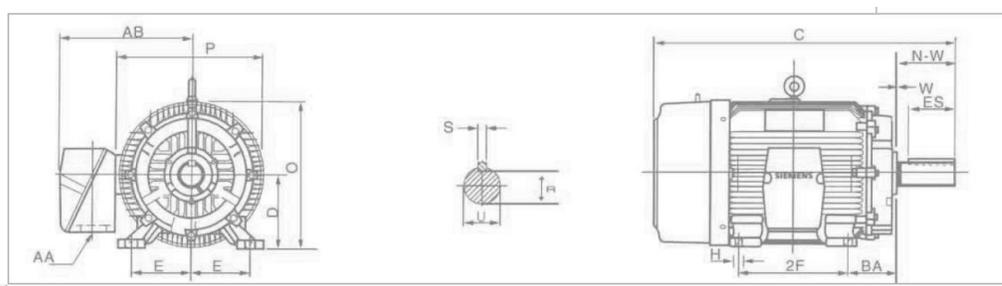
40°C temperatura ambiente a una altitud de 1000 msnm

Con la tabla 9 se dimensiona el motor de 50 hp cuyas dimensiones se encuentran en NEMA 365 TS

¹⁶ Alibaba, Máquina de la minería aurífera molino de bola, [online] China 2011

TABLA 9. Dimensiones Motores

Dimensiones de motores horizontales en pulgadas													
NEMA	S	ES	C	D	E	2F	BA	N-W	O	P	H	AB	U
143T	.188	1.38	12.2	3.50	2.75	4	2.25	2.25	6.93	7.7	.13	6.46	.875
145T	.188	1.38	13.3	3.50	2.75	5	2.25	2.25	6.93	4.7	.13	6.46	+ .0000 - .0005
182T	.250	1.75	14.2	4.50	3.75	4.50	2.75	2.75	8.86	9.7	.13	7.36	1.125
184T	.250	1.75	15.2	4.50	3.75	5.50	2.75	2.75	8.86	9.7	.13	7.36	+ .0000 - .0005
213T	.313	2.38	18.0	5.25	4.25	5.50	3.50	3.38	10.62	11.2	.13	9.02	1.375
215T	.313	2.38	19.1	5.25	4.25	7	3.50	3.38	10.62	11.2	.13	9.02	+ .0000 - .0005
254T	.375	2.88	22.3	6.25	5	8.25	4.25	4	12.62	13.4	.13	9.92	1.625
256T	.375	2.88	24.1	6.25	5	10	4.25	4	12.62	13.4	.13	9.92	+ .000 - .001
284T	.500	3.25	28.8	7	5.50	9.50	4.75	4.63	14.19	15.5	.13	12.94	1.875
286T	.500	3.25	28.8	7	5.50	11	4.75	4.63	14.19	15.5	.13	12.94	+ .000 - .001
284TS	.375	1.88	27.5	7	5.50	9.50	4.75	3.25	14.19	15.5	.13	12.94	1.625
286TS	.375	1.88	27.5	7	5.50	11	4.75	3.25	14.19	15.5	.13	12.94	+ .000 - .001
324T	.500	3.88	32.0	8	6.25	10.50	5.25	5.25	15.94	17.1	.13	15.75	2.125
326T	.500	3.88	32.0	8	6.25	12	5.25	5.25	15.94	17.1	.13	15.75	+ .000 - .001
324TS	.500	2	30.0	8	6.25	10.50	5.25	3.75	15.94	17.1	.13	15.75	1.875
326TS	.500	2	30.0	8	6.25	12	5.25	3.75	15.94	17.1	.13	15.75	+ .000 - .001
364T	.625	4.25	34.2	9	7	11.25	5.88	5.88	17.81	18.5	.38	17.69	2.375
365T	.625	4.25	34.2	9	7	12.25	5.88	5.88	17.81	18.5	.38	17.69	+ .000 - .001
364TS	.500	2	32.1	9	7	11.25	5.88	3.75	17.81	18.5	.38	17.69	1.875
365TS	.500	2	32.1	9	7	12.25	5.88	3.75	17.81	18.5	.38	17.69	+ .000



Fuente: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/huerta_t_ca/apendiceA.pdf

3.3 PARAMETROS DE OPERACION DEL MOLINO

3.3.1 Velocidad del molino. La velocidad de giro para alcanzar un rendimiento óptimo en la molienda se da como un porcentaje de la velocidad crítica, velocidad a la cual las bolas bajo el efecto de la fuerza centrífuga, se adhieren al cuerpo del molino y giran junto con este. Normalmente los molinos giran a velocidades entre el 50% y el 90% de su velocidad crítica, dependiendo de la forma de los cuerpos

moledores, volumen de carga, forma del revestimiento y el tipo de acción deseado en la masa moledora.

Aplicando ecuaciones 1 y 2 se obtuvo la velocidad crítica y la velocidad de trabajo del molino de bolas

$$v_c \approx \frac{76.62}{\sqrt{D}} \quad \text{ec. 1}$$

Es recomendable que la velocidad de trabajo del molino este entre 75% y 78% de la velocidad crítica

$$v_t \approx 0.75v_c \quad \text{ec. 2}$$

En nuestro caso $D = 5 \text{ pies} = 1.524 \text{ mt}$

$$v_c \approx \frac{76.62}{\sqrt{5}} = 34.26 \text{ RPM}$$

$$v_c \approx \frac{42.3}{\sqrt{1.524}} = 34.26 \text{ RPM, para } D \text{ dada en metros}$$

$$v_t = 0.75v_c = 26 \text{ RPM}$$

3.3.2 Capacidad del molino de bolas. La capacidad del molino se refiere a la cantidad de material que se reduce a un tamaño de liberación satisfactorio por unidad de tiempo. Para hallar la capacidad de un molino de bolas se necesita saber algunos factores, estos son: longitud, diámetro, número de cámaras, velocidad, peso de los cuerpos moledores, forma y dimensiones, propiedades físico mecánicas del material molido, la finura y el tiempo de la molienda, entre otros. Hay algunas expresiones empíricas para realizar el cálculo de la capacidad, una de estas es la ecuación 7.

$$q \approx \frac{s * g * n * x * F * \square * 60}{d * c * 10^6} \quad \text{ec. 7}$$

q: capacidad del molino en ton/h

s: sección transversal del molino

g: peso de los cuerpos moledores

n: velocidad del molino en r.p.m

x: residuo sobre el tamiz de 4900 mallas/cm²

μ: coeficiente de aflujamiento de las bolas

ψ : rata de llenado del molino

d: diámetro de las partículas de alimentación

oc: resistencia a la compresión del material en kg/cm²

ρ: densidad del material

3.3.3 Consumo de potencia. La energía requerida por el molino de bolas sin considerar las pérdidas que se generan en el proceso (perdidas por fricción) está compuesta del trabajo de elevación y aceleración de la carga. De la potencia eléctrica suministrada, se genera pérdidas del 10% en el motor, y entre el 10% y el 15% en los piñones y en fricción mecánica del molino. Parte de la energía se transfiere en calor, ruido y desgaste del metal.

- Calculo de potencia según bond. La energía consumida en la molienda puede calcularse con gran exactitud utilizando el método de bond, como se indica en la ecuación 8.¹⁷

$$w = wi * \frac{\sqrt{f} \sqrt{p}}{\sqrt{f}} * \sqrt{\frac{100}{p}} \quad \text{ec. 8}$$

Dónde:

w: energía consumida en la molienda en kw/h por tonelada requerida de material

f: tamaño de la alimentación del molino en micrones

p: tamaño del producto en micrones

wi: índice de trabajo. Generalmente se trabaja con $wi = 13.81 * \frac{kw \cdot hora}{tonelada}$

Se trabajara con un tamaño de alimentación para el molino que sea menor o igual a 0.9842 pulgadas. Se realizara el cálculo con la alimentación máxima, para así obtener la potencia máxima consumida.

¹⁷ CADAVID VELEZ, Carlos. GOMEZ VELASQUEZ, Luis. Diseño de un molino de bolas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín 1983.

$$f = 0.9842 \text{ pulg} = 24998.68 \text{ micrones}$$

El tamaño del material de descarga o salida estará entre el rango de 0.002913 y 0.01574 pulgadas, por lo tanto se trabajara con el valor máximo $P = 0.01574$ pulgadas; de donde $P = 399.796$ micrones. Entonces la potencia consumida en la molienda es la siguiente:

$$w = wi * \frac{\sqrt{f} \sqrt{p}}{\sqrt{f}} * \sqrt{\frac{100}{p}} \quad \text{ec 8.}$$

$$w = 13.81 \frac{\text{kw/h}}{\text{ton}} * \frac{\sqrt{24998.68} \sqrt{399.796}}{\sqrt{24998.68}} * \sqrt{\frac{100}{399.796}}$$

$w = 6.03 \frac{\text{kw}}{\text{h ton}}$ Por lo tanto la potencia consumida en la molienda para una capacidad de 120 toneladas día es:

$$p.c = 6.03 \frac{\text{kw/h}}{\text{ton}} * \frac{120 \text{ton}}{24 \text{h}}$$

$$p.c = 30.15 \text{kw} \quad (40.41 \text{hp})$$

Para diseño se incrementa en un 25% la potencia para que así el molino tenga un desempeño eficiente, de donde la potencia consumida será:

$$p.c = 30.15 * 25\%$$

$$p.c = 7.53$$

$$p.c = 37.68 \text{kw} \quad (50.5 \text{hp})$$

Como la velocidad de trabajo del molino va a ser de 26 RPM y la velocidad que brinda (genera) el motor es de 1200 RPM se necesita un dispositivo que regule la velocidad del motor a la velocidad de trabajo del molino.

3.4 ALTERNATIVAS PARA LA REDUCCION DE VELOCIDAD

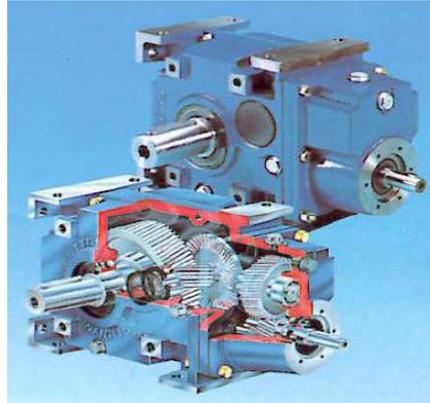
Para este proyecto se analizaron dos alternativas las cuales contemplan el uso de un reductor de velocidad de piñones o un sistema de transmisión por poleas y correas.

3.4.1 Alternativa 1. Reductores de velocidad de piñones

Los reductores de velocidad son equipos mecánicos utilizados para el accionamiento de muchas máquinas de uso industrial en los que se requiere reducir la velocidad, en la figura 11 se observa un reductor de velocidad en general. Un motorreductor se obtiene acoplado un motor eléctrico al reductor y se presenta como una solución completa e idónea de accionamiento obteniendo importantes ventajas, tales como:

- Alta eficiencia de la transmisión de potencia del motor hacia la aplicación.
- Excelentes prestaciones en cuanto a potencia y torques transmitidas.
- Baja emisión/contaminación de ruido hacia el exterior.
- Practicidad y conveniencia de costos al poder usar motores de 4 polos en lugar de motores de 6 u 8 polos. Baja necesidad de mantenimientos periódicos.
- Confiabilidad y larga vida útil del sistema electromecánico debido a su diseño robusto y calidad de materiales.

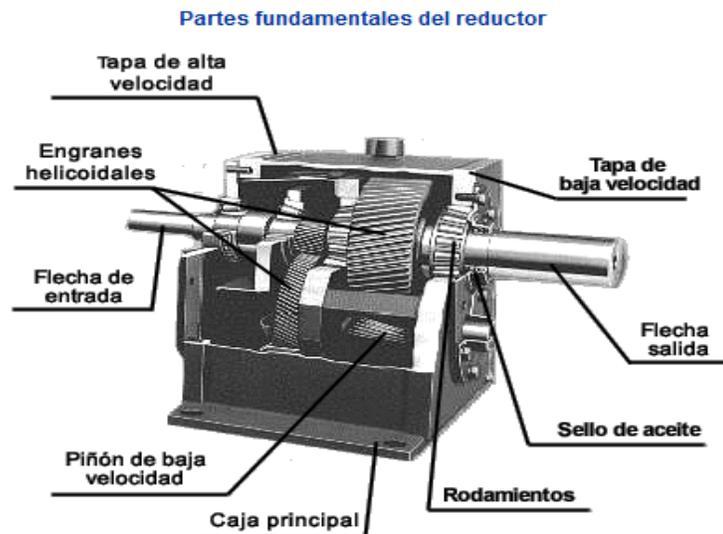
Figura 11. Reductor de Velocidad



Fuente: Tecnotrans SA, elementos de transmisión mecánica – reductores de velocidad, [online] Barcelona 2000.P.1

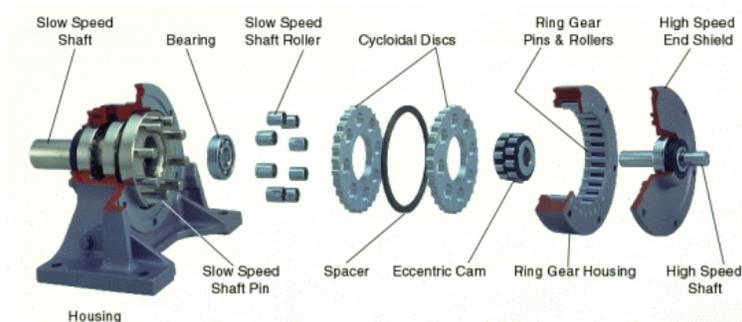
Un reductor es un “sistema cerrado”, obedece al principio de la conservación de la energía, donde la energía que entra al sistema es igual a la energía que sale del mismo, más las pérdidas generadas al interior de este. En un sistema reductor ideal (sin pérdidas) se lograría una transferencia óptima de potencia desde la entrada del motor hacia la carga o salida. En la figura 12 y 13 se muestran las partes de un reductor.

Figura 12. Partes de reductor



Fuente: Rexnord, reductores, [online] Santiago de Chile 2011

Figura 13. Partes reductor de piñón



Amazon, Casquillos, Discos Cicloidales, Espaciador, Balinera Excentrica, Housing de Pines, Eje de Entrada con tapadera.

Fuente: Dreyfus, partes que componen el reductor, [online] España 2011

- Guía para la elección del tamaño de reductor de velocidad. Para seleccionar adecuadamente una unidad de reducción se debe tener en cuenta la siguiente información básica:

Características de operación

- ◆ Potencia (HP tanto de entrada como de salida)
- ◆ Velocidad (RPM de entrada como de salida)
- ◆ Torque (par) máximo a la salida en kg-m.
- ◆ Relación de reducción (I).

Características del trabajo a realizar

- ◆ Tipo de máquina motriz (motor eléctrico, a gasolina, etc.)
- ◆ Tipo de acople entre máquina motriz y reductor.
- ◆ Tipo de carga uniforme, con choque, continua, discontinua etc.
- ◆ Duración de servicio horas/día.
- ◆ Arranques por hora, inversión de marcha.

Potencia de selección (P_n). Para calcular la potencia (P_n) del Motorreductor a acoplar, a una determinada carga, la potencia requerida por la máquina accionada a través del Motorreductor se debe multiplicar por el FACTOR DE SERVICIO; el resultado se llamará Potencia requerida. En algunos casos es más importante el torque que puede dar un Motorreductor que la Potencia, por lo que en la elección se tendrá más en cuenta este PAR (Torque del motor). Para el

cálculo del Factor de Servicio se tendrán en cuenta las características específicas de trabajo a realizar, enunciadas anteriormente.

Instalación. Para un buen funcionamiento de las unidades de reducción es indispensable tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- ◆ Las unidades deben montarse sobre bases firmes para eliminar vibraciones y desalineamientos en los ejes.
- ◆ Si la transmisión de la unidad a la máquina es por acople directo entre ejes, es indispensable garantizar una perfecta alineación y centrado. Si la transmisión se hace por cadenas o correas, la tensión dada a estos elementos debe ser recomendada por el fabricante, previas una alineación entre los piñones o poleas.
- ◆ Las unidades de acoplamiento deben montarse cuidadosamente sobre los ejes para no dañar los rodamientos y lo más cercanas a la carcasa para evitar cargas de flexión sobre los ejes.
- ◆ Antes de poner en marcha los Motorreductores, es necesario verificar que la conexión del motor sea la adecuada para la tensión de la red eléctrica.

Mantenimiento. Los engranajes y los rodamientos están lubricados por inmersión o salpique del aceite alojado en la carcasa. Se debe revisar el nivel del aceite antes de poner en marcha la unidad de reducción. En la carcasa se encuentran los tapones de llenado, nivel y drenaje de aceite. El de llenado posee un orificio de ventilación el cual debe permanecer limpio. Los motorreductores tienen una placa de identificación, en la cual se describe el tipo de lubricante a utilizar en condiciones normales de trabajo.

Factor de servicio (f_s). Es el factor que tiene en consideración, con suficiente aproximación, la variación de carga y los eventuales golpes a los que está expuesto el reductor para un determinado tipo de servicio. El gráfico de la tabla 3 permite seleccionar el factor de servicio f_s una vez establecidos los siguientes parámetros:

- ◆ Naturaleza de la carga en función del factor de aceleración de la masa K: A-B-C.
- ◆ Horas de funcionamiento diarias: horas/día (h/d).
- ◆ Frecuencia de paradas/arrancadas por hora.
- ◆ Los valores intermedios de fs se podrán obtener mediante interpolación.

➤ Clase de carga

- ◆ A: Carga uniforme $K \leq 0.30$
- ◆ B: carga con golpes moderados $K \leq 3.0$
- ◆ C: carga con golpes fuertes $K \leq 10$

TABLA 10. Factor de Servicio

Tabla de factores			
TIPO DE CARGA	DURACION DE SERVICIO EN HS		
	2	10	24
1) Uniforme	0.8	1.0	1.25
2) Choque moderado	1.0	1.25	1.5
3) Choque fuerte	1.5	1.75	2.0

Fuente: http://www.eliopulossa.com/productos/tabla_de_potencias/tabla_de_potencias.pdf

Cargas uniformes sin variaciones y sin choque. Son aquellas en las cuales la carga normal sufre variaciones pequeñas, momentáneas e irregularmente poco frecuentes.

Cargas con variaciones y choques leves. Son aquellas que se presentan bajo la forma de pulsaciones, paradas y/o reversiones en marcha, como los mezcladores o agitadores de densidad variable, maquinas textiles.

Cargas con fuertes variaciones. Estas presentan grandes y frecuentes choques o esfuerzos, Ejemplo: elevadores de carga de servicio arduo (comerciales industriales), cilindros de laminación o de la industria del caucho y papel, movimientos de brazos y palancas en máquinas de extracción.¹⁸

En la siguiente tabla se puede observar que reductor se adapta mejor a las características que se necesitan para realizar la reducción a la velocidad de

¹⁸ Eliopulos S.A, Tablas de potencia, [online], pag 1

trabajo requerida, de esta tabla se determina que el reductor de velocidad adecuado que satisface las necesidades que se requieren para obtener un buen desempeño del proceso es el de 1.5 h.p, el cual nos brinda una velocidad de salida de 16 26 RPM, modelo SMR3 25/1.

TABLA 11. Tabla de selección del modelo de reductor

Clase 3 Datos De USO					
HP	Velocidad De Salida	Selección De Reductores (Modelo)		Diámetro Mínimo De Polea	Barreno Máximo (Pulgadas)
.25	4-6		SMR2-25/1	3.0	1-15/16
.33	5-9		SMR2-25/1	3.0	1-15/16
.50	4-5		SMR4-25/1	4.6	2-7/16
	6-7		SMR3-25/1	4.0	2-3/16
	8-15		SMR2-25/1	3.0	1-15/16
.75	4		SMR5-25/1	5.4	2-15/16
	5-7		SMR4-25/1	4.6	2-7/16
	8-12		SMR3-25/1	4.0	2-3/16
	13-23		SMR2-25/1	3.0	1-15/16
1	4-6		SMR5-25/1	5.4	2-15/16
	7-10		SMR4-25/1	4.6	2-7/16
	11-17		SMR3-25/1	4.0	2-3/16
	18-32		SMR2-25/1	3.0	1-15/16
1.5	4-5		SMR6-25/1	6.2	3-7/16
	6-10		SMR5-25/1	5.4	2-15/16
	11-15		SMR4-25/1	4.6	2-7/16
	16-26		SMR3-25/1	4.0	2-3/16
	27-51	SMR2-15/1	SMR2-25/1	3.0	1-15/16
2	5-7		SMR6-25/1	6.2	3-7/16
	8-13		SMR5-25/1	5.4	2-15/16
	14-21		SMR4-25/1	4.6	2-7/16
	22-36	SMR3-15/1	SMR3-25/1	4.0	2-3/16
	37-71	SMR2-15/1	SMR2-25/1	3.0	1-15/16
3	8-12		SMR6-25/1	6.2	3-7/16
	13-20		SMR5-25/1	5.4	2-15/16
	21-32		SMR4-25/1	4.6	2-7/16
	33-57	SMR4-15/1	SMR4-25/1	4.6	2-7/16
	58-70	SMR3-15/1	SMR3-25/1	4.0	2-3/16
	71-85	SMR2-15/1	SMR2-25/1	3.0	1-15/16
	86-89	SMR2-15/1	SMR2-25/1	3.0	1-15/16
	90-113	SMR2-15/1	SMR2-25/1	3.0	1-15/16

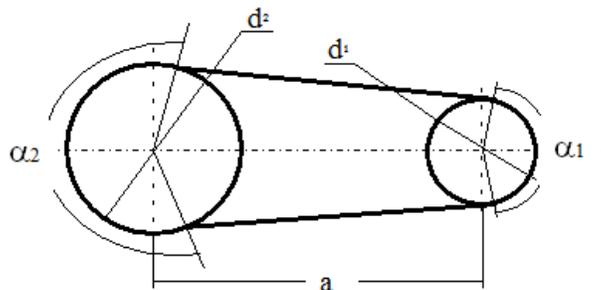
Fuente: <http://www.worldwideelectric.net/Brochures/SMR-Spanish.pdf>

3.4.2 Alternativa 2 transmisión por poleas y correas. Debido al costo y al mantenimiento que requieren los reductores de velocidad de piñón se optó por realizar la reducción de la velocidad por el método de transmisión de poleas y correas ya que este método brinda una eficiencia del 97 a 98% y su costo es mucho menor al de la alternativa anterior.

Las transmisiones por correa, en su forma más sencilla, consta de una cinta colocada con tensión en dos poleas: una motriz y otra movida. Al moverse la cinta

(correa) transmite energía desde la polea motriz a la polea movida por medio del rozamiento que surge entre la correa y las poleas, como se muestra en la figura 14.¹⁹

Figura 14. Esquema de una transmisión por correa



Fuente: El prisma, transmisión por correas, [online] Asturias España 2011

En la figura anterior son identificados los parámetros geométricos básicos de una transmisión por correas, siendo:

1. Polea menor.
 2. Polea mayor.
- ↪1: Ángulo de contacto en la polea menor.
↪2: Ángulo de contacto en la polea mayor.
a: Distancia entre centros de poleas.
d1: Diámetro primitivo de la polea menor.
d2: Diámetro primitivo de la polea mayor.

Durante la transmisión del movimiento, en un régimen de velocidad uniforme, el momento producido por las fuerzas de rozamiento en las poleas (en el contacto correa-polea) será igual al momento motriz en el árbol conductor y al del momento resistivo en el árbol conducido. Cuanto mayor sea el tensado, el ángulo de contacto entre polea y correa, y el coeficiente de rozamiento, tanto mayor será la carga que puede ser transmitida por el accionamiento de correas y poleas.

Como puede ser comprendido, la transmisión por correa clasifica dentro de las transmisiones mecánicas con movimiento de rotación que emplean como fundamento básico, para dar continuidad al movimiento, la transmisión por rozamiento con un enlace flexible entre el elemento motriz y el movido. Esta particularidad le permite algunas ventajas que posibilitan recomendar las transmisiones por correas en usos específicos, como son:

- ♦ Posibilidad de unir el árbol conductor al conducido a distancias relativamente grandes.

¹⁹ El prisma, transmisión por correas, [online] Asturias España 2011

- ✦ Funcionamiento suave, sin choques y silencioso.
- ✦ Facilidad de ser empleada como un fusible mecánico, debido a que presenta una carga límite de transmisión, valor que de ser superado produce el patinaje (resbalamiento) entre la correa y la polea.
- ✦ Diseño sencillo.
- ✦ Costo inicial de adquisición o producción relativamente bajo.
- ✦ Los inconvenientes principales de la transmisión por correa, que limitan su empleo en ciertos mecanismos y accionamientos son:
 - ✦ Grandes dimensiones exteriores.
 - ✦ Inconstancia de la relación de transmisión cinemática debido al deslizamiento elástico.
 - ✦ Grandes cargas sobre los árboles y apoyos, y por consiguiente considerables pérdidas de potencia por
 - ✦ fricción.
- ✦ Vida útil de la correa relativamente baja.

En un accionamiento por correa, el órgano de tracción (correa de transmisión) es un elemento de suma importancia que determina la capacidad de trabajo de toda la transmisión. Las correas se distinguen por la forma de la sección transversal, por la construcción, material y tecnología de fabricación, pero el rasgo más importante que determina la construcción de las poleas y de toda la transmisión, es la forma de la sección transversal de la correa. En función de la forma de la sección transversal, las correas de transmisión son clasificadas como:

- ✦ Correas planas.
- ✦ Correas trapeciales o en V.
- ✦ Correas redondas.
- ✦ Correas eslabonadas.
- ✦ Correas dentadas.
- ✦ Correas nervadas o Poly V.

En la tabla siguiente, son comparados los tipos básicos de correas mediante variados criterios, que permiten apreciar las amplias posibilidades de empleo que ofrecen las diferentes correas en la industria actual.²⁰

TABLA 12. Comportamiento de los tipos básicos de correas ante algunos criterios comparativos

Criterio	Plana	Trapezial	Eslabonada	Dentada	Poly V	Redonda
Carga en los árboles	muy grande	pequeña	pequeña	minima	grande	muy grande
Trabajo a $V = 25$ m/s	aceptable	aceptable	malo	bueno	aceptable	regular
Resistencia a los choques	muy buena	bueno	regular	aceptable	muy buena	bueno
Eficiencia %	97 98	96 97	95 96	98 ... 99	96 97	96 ... 95
Longitud de correa.	libre	normalizada	libre	dependiente	normalizada	libre
Tolerancia a la desalineación	pequeña	grande	grande	pequeña	pequeña	muy grande
Nivel de ruido	muy bajo	muy bajo	bajo	bajo	bajo	bajo
Sincronismo	no	no	no	si	no	no
Costo inicial	bajo	bajo	bajo	moderado	moderado	minimo
Necesidad de control del tensado	alguna	escasa	alguna	escasa	alguna	alguna
Facilidad de montaje entre apoyos	si	no	si	no	no	si
Ancho reducido	no	si	si	si	no	si
Diámetro reducido	si	no	no	no	si	no

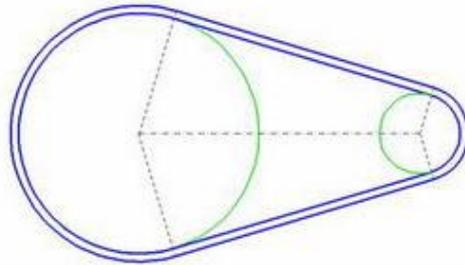
Fuente: http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_mecanica/transmisioncorrea/

- Clasificación de las transmisiones por correas. Gracias a la flexibilidad del elemento de tracción, la transmisión por correa admite una disposición relativamente arbitraria de los ejes de las poleas conductoras y conducidas, y un variado número de poleas en la transmisión. Una forma de clasificar la transmisión por correa está basada en el esquema o disposición de las poleas y correas en el accionamiento.

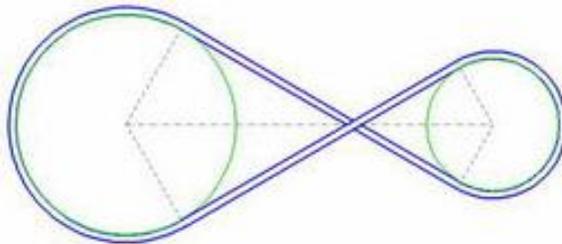
- Transmisión por correa abierta. Se emplea en árboles paralelos si el giro de estos es un mismo sentido. Es la transmisión más difundida. En estas

²⁰ El prisma, transmisión por correas, [online] Asturias España 2011

transmisiones la flexión en la correa es normal y depende fundamentalmente del diámetro de la polea menor.

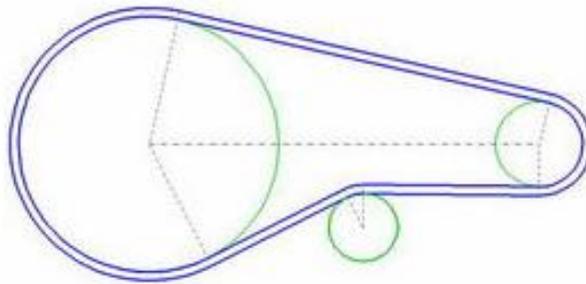


- Transmisión por correa semicruzada. Se emplea si los árboles se cruzan (generalmente a 90°). Es recomendable que la disposición definitiva de las poleas se haga luego de verificar la transmisión en la práctica, para que no salte la correa de las poleas. Es recomendable elegir una distancia entre ejes mayores de 4 veces la suma del diámetro d_p y el ancho de la polea con eje horizontal.

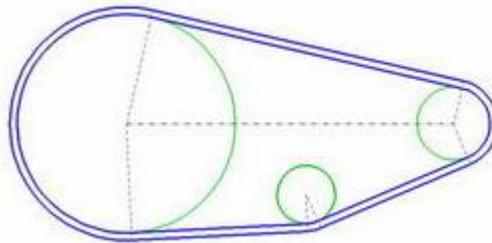


- Transmisión por correa con rodillo tensor exterior. Se emplea cuando es imposible desplazar las poleas para el tensado de las correas y se desea

aumentar el ángulo de contacto en la polea menor (mayor capacidad tractiva). Las correas con perfil asimétrico sufren una flexión inversa.

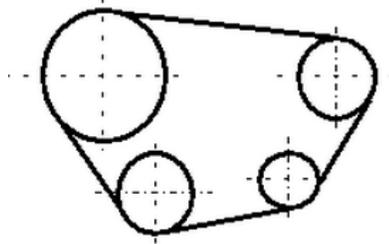


- Transmisión por correa con rodillo tensor interior. Se emplea cuando es imposible desplazar las poleas para el tensado de las correas. En casos que se pueda disminuir el ángulo de contacto en la polea menor produce una mejora en la vida útil de la correa por producir en ella una flexión normal.



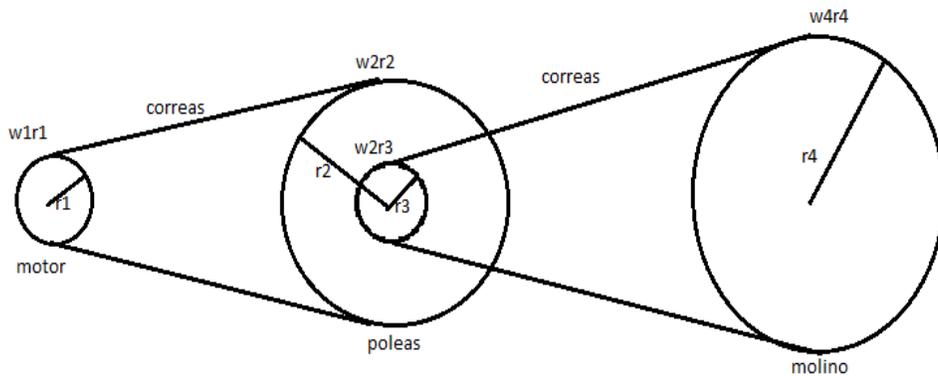
- Transmisión por correa con múltiples poleas. Se emplea para transmitir el movimiento desde un árbol a varios árboles que están dispuestos

paralelamente. Las poleas puede estar con relación a la correa con un montaje interior o combinado (admisible con perfiles simétricos).²¹



Para el diseño de la etapa reductora se tiene la velocidad del motor, el diámetro del mismo, el diámetro de las poleas y del molino y la velocidad a la que el molino debe girar. Con estos parámetros se calcularon las poleas que son necesarias para realizar la etapa de reducción.

Figura 15. Esquema general de la reducción por poleas



Para el cálculo de las velocidades angulares se indican las ecuaciones 9 y 10

$$w1 * r1 = w2 * r2 \quad \text{ecu } 9.$$

$$w2 * r3 = w4 * r4 \quad \text{ecu } 10.$$

Dónde:

W1 = velocidad angular del motor eléctrico

W2 = velocidad angular de las poleas

W4 = velocidad angular del molino

²¹ http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_mecanica/transmisioncorrea/default6.asp

R1 = diámetro motor
R2 = diámetro polea1
R3 = diámetro polea2
R4 = diámetro molino

$$w1 \square 1200RPM$$

$$w4 \square 26RPM$$

$$r1 \square 0.5 \text{ pies}$$

$$r4 \square 2.5 \text{ pies}$$

$$r2 \square 2 \text{ pies}$$

$$w2 \square \frac{w1 * r1}{r2} \square \frac{1200 * 0.5}{3} \square 200RPM$$

$$r3 \square \frac{w4 * r4}{w2} \square \frac{26 * 2.5}{200} \square 0.325 \text{ pies}$$

3.4.3 Variador de velocidad micromaster 440. La serie MICROMASTER440 es una gama de convertidores de frecuencia (también denominados variadores) para modificar la velocidad de motores trifásicos. Los distintos modelos disponibles abarcan un rango de potencias desde 120 W para entrada monofásica hasta 75 kW con entrada trifásica.

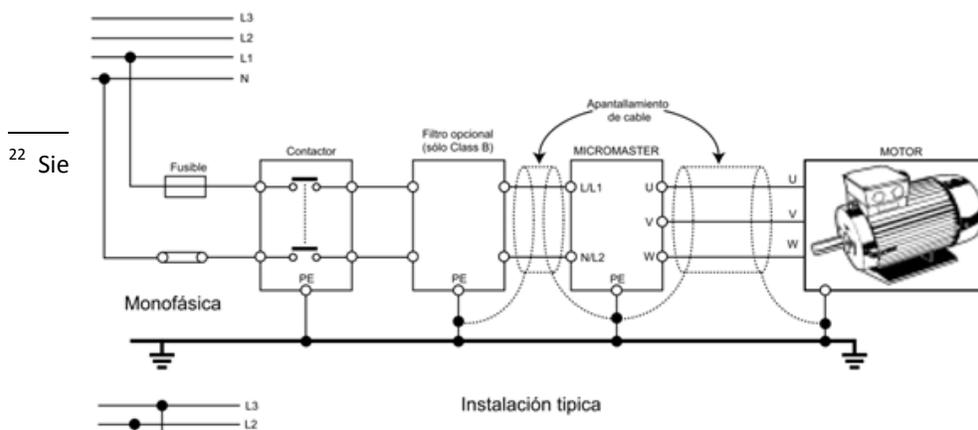
Los convertidores están controlados por microprocesador y utilizan tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de última generación. Un método especial de modulación por ancho de impulsos con frecuencia de pulsación seleccionable permite un funcionamiento silencioso del motor.

- características principales
 - ◆ Fácil de instalar, parametrizar y poner en servicio
 - ◆ Diseño robusto en cuanto a CEM
 - ◆ Puede funcionar en alimentación de línea IT
 - ◆ Tiempo de respuesta a señales de mando rápido y repetible
 - ◆ Amplio número de parámetros que permite la configuración de una gama extensa de aplicaciones
 - ◆ Conexión sencilla de cables

- ✦ Relés de salida
- ✦ salidas analógicas (0 – 20 mA)
- ✦ 6 entradas digitales NPN/PNP aisladas y conmutable
- ✦ entradas analógicas:
 - ✦ AIN1: 0 – 10 V, 0 – 20 mA y -10 a +10 V
 - ✦ AIN2: 0 – 10 V, 0 – 20 mA
- ✦ Las 2 entradas analógicas se pueden utilizar como la 7 a y 8 a entrada digital
- ✦ Diseño modular para configuración extremadamente flexible
- ✦ Altas frecuencias de pulsación para funcionamiento silencioso del motor
- ✦ Información de estado detallada y funciones de mensaje integradas
- ✦ Opciones externas para comunicaciones por PC, panel BOP (Basic Operator Panel), panel AOP (Advanced Operator Panel) y módulo de comunicación PROFIBUS.²²

En la figura 16 se muestra el plano de instalaciones eléctrica del motor a la red, sea esta trifásica o monofásica.

Figura 16. PLANO DE INSTALACION ELECTRICA



Fuente: Siemens, instalaciones eléctricas de un motor, [online] hurlingham Buenos Aires 2010

Por medio del software Moly-cop tools se realizaron los cálculos de algunos parámetros necesarios para el proceso de la molienda, en la siguiente figura se muestran dichos parámetros. Los cuales son la cantidad de agua que se le debe ingresar al molino de bolas y al hidrociclón en metros cúbicos, y la malla que se obtiene a la salida de este circuito cerrado para una óptima extracción del oro en la etapa de lixiviación.

3.5 CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE HIDROCICLONES

La separación rápida y la clasificación efectiva de las partículas sólidas en un medio denso se logran aumentando la magnitud de las fuerzas que actúan sobre ellas. Los clasificadores centrífugos logran este aumento reemplazando las fuerzas gravitacionales a las que están sujetas las partículas por fuerzas centrífugas. Dentro de los clasificadores centrífugos, los dispositivos más simples son los hidrociclones, tanto por sus componentes (no poseen partes móviles), como por su facilidad de operación y control.

Para el diseño de un ciclón se dispone de dos geometrías básicas: Cónica y Cilíndrica con fondo plano. La configuración cónica, convencional, se fabrica además con diferentes ángulos de cono y longitudes de la sección cilíndrica. La configuración cilíndrica, fondo plano, se emplea principalmente para la obtención

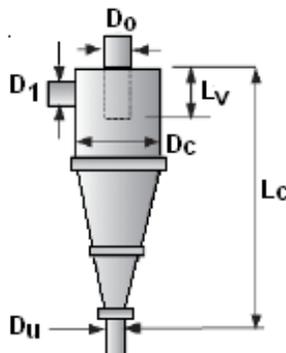
de tamaños de corte gruesos, lo que la hace especialmente indicada para la clasificación en circuitos cerrados de molienda, pudiendo variarse la longitud de la parte cilíndrica.

En la Figura 17 se muestra un esquema típico de un hidrociclón cónico que es el que se utilizó en este proyecto. Se debe tener en cuenta que la entrada (alimentación) es tangencial al cilindro de alimentación (feed cylinder). La forma de la sección de entrada es circular para obtener un buen perfil de velocidad del fluido de entrada.

En el diseño se debe tener en cuenta el recubrimiento interno que poseen tanto el cilindro de alimentación como las secciones cónicas posteriores, el cual consiste en una capa de caucho u otros revestimientos sintéticos (Neopropeno o Uretano), esto debido a la naturaleza abrasiva de los fluidos que se procesan.

Para las dimensiones utilizadas en el diseño y construcción de los hidrociclones, es necesario conocer que estas son de origen empírico, y que existen diferencias en las dimensiones si se considera el hidrociclón como un dispositivo de clasificación o uno con el propósito de disminuir la cantidad de agua en una mezcla. Las relaciones entre estas dimensiones (mostradas en la figura 17) se muestran en las tablas 13 y 14.²³

Figura 17. Dimensiones de un Hidrociclón



Fuente: Cuevas, J., Torres F. Diseño de Hidrociclón. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2010

TABLA 13.

DIMENSIONES PARA LAS PARTES DE UN HIDROCICLON		
HYDROCICLONE (DEWATERING)	HYDROCICLONE (CLASSIFIER)	
Inlet diameter $D_i = D_c/4$	Inlet diameter $D_i = D_c/7$	
Vortex finder diameter $D_o = D_c/3$	Vortex finder diameter $D_o = D_c/5$	
Length or height $L_c = 5D_c$	Diameter of underflow = $D_c/15$	
Length of Vortex finder $L_v = 0.4D_c$	Length of Vortex finder $L_v = 0.4D_c$	
	Length of cyclone = $3D_c$	
DIMENSIONES ESTANDAR DE UN HIDROCICLON SEGUN DIVERSOS AUTORES		
Cyclone Parameters	Mular and Jull [11]	Arterbum [12]
Cross-Sectional area of feed	6-8% of the cross sectional	$(0.015-0.02)\pi D_c$
Ring at point of entry	Area of the feed chamber	

Fuente: Cuevas. J., Torres F. Diseño de Hidrociclón. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2010

Para obtener la granulometría de salida deseada, se determina el valor para el d_{50C} , que equivale al diámetro con el cual las partículas de oro tienen el 50% de probabilidades de salir por el overflow y el 50% de salir por el underflow. El valor del d_{50c} es muy importante ya que es el parámetro más controlable para obtener en el overflow partículas de la granulometría deseada.

El d_{50c} se relaciona con el tamaño del hidrociclón, a partir de la ecuación 11:

$$d_{50c} = 2,84 \times D_c^{0,66} \quad 11.$$

En ecuación anterior D_c corresponde al diámetro del hidrociclón expresado en centímetros.

Si se asume que d_{50C} es de $50\mu m$ (valor recomendado al salida del hidrociclón en la clasificación aurífera), se obtiene:

$$50\mu m = 2.84 \times D_c^{0,66}$$

Resolviendo la ecuación anterior se obtiene: $D_c = 77.1 \text{ cm}$ para dar cierta tolerancia se toma $D_c = 78 \text{ cm}$, con este valor estimado las demás dimensiones del hidrociclón se obtienen a partir de la tabla 3.5 así:

Tabla 14. Dimensiones del hidrociclón

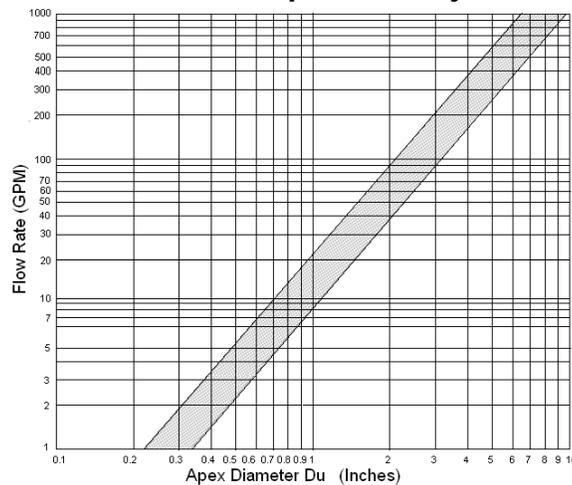
HIDROCICLON

Parámetro	Cm	pul.
Diámetro del hidrociclón (D_c)	78	30.7
Diámetro de alimentación ($D_I = D_c/7$)	11.1	4.37
Diámetro Vortex ($D_0 = D_c/5$)	15.6	6.14
Diámetro Apex ($D_U = D_c/15$)	5.2	2.04
Longitud del vortex ($L_V = 0.4D_c$)	31.2	12.3
Longitud hidrociclón ($L_C = 3D_c$)	234	92.1

Fuente: Cuevas. J., Torres F. Diseño de Hidrociclón. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2010

La Figura 18, muestra la relación aproximada entre el flujo volumétrico en el hidrociclón y el radio mínimo del Apex para su correcto funcionamiento.

Figura 18. Diámetro del Apex VS Flujo Volumétrico



Fuente: Cuevas. J., Torres F. Diseño de Hidrociclón. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2010

Al diseñar un hidrociclón es conveniente tener en cuenta la siguiente lista de observaciones:

- ◆ Resultados experimentales muestran que una sección rectangular en la entrada de alimentación produce mejores resultados.
- ◆ Mayores secciones a la entrada permiten el ingreso de mayores flujos, lo que se traduce en un aumento en la velocidad tangencial del flujo al interior del ciclón.

- ◆ Hidrociclones de mayor diámetro son mejores para conseguir clasificaciones de mayor tamaño, ya que la aceleración en el interior del Hidrociclón será menor.
- ◆ Secciones cilíndricas (cilindro de alimentación) más largas producen mayores caudales en el underflow.
- ◆ Secciones cilíndricas (cilindro de alimentación) más cortas producen separaciones de mayor tamaño (tamaño "de corte" mayor).
- ◆ Secciones cónicas de menor ángulo logran clasificaciones más finas (el tamaño "de corte" se reduce).²⁴

3.6 MODELOS Y ESPECIFICACIONES HIDROCICLONES

En la tabla 15 se pueden observar varios modelos de hidrociclones, con una capacidad de procesamiento de material distinto; esta tabla nos muestra el caudal, tonelaje y corte medio del material que puede manejar.

TABLA 15.

²⁴ Cuevas. J., Torres F. Diseño de Hidrociclón. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2010

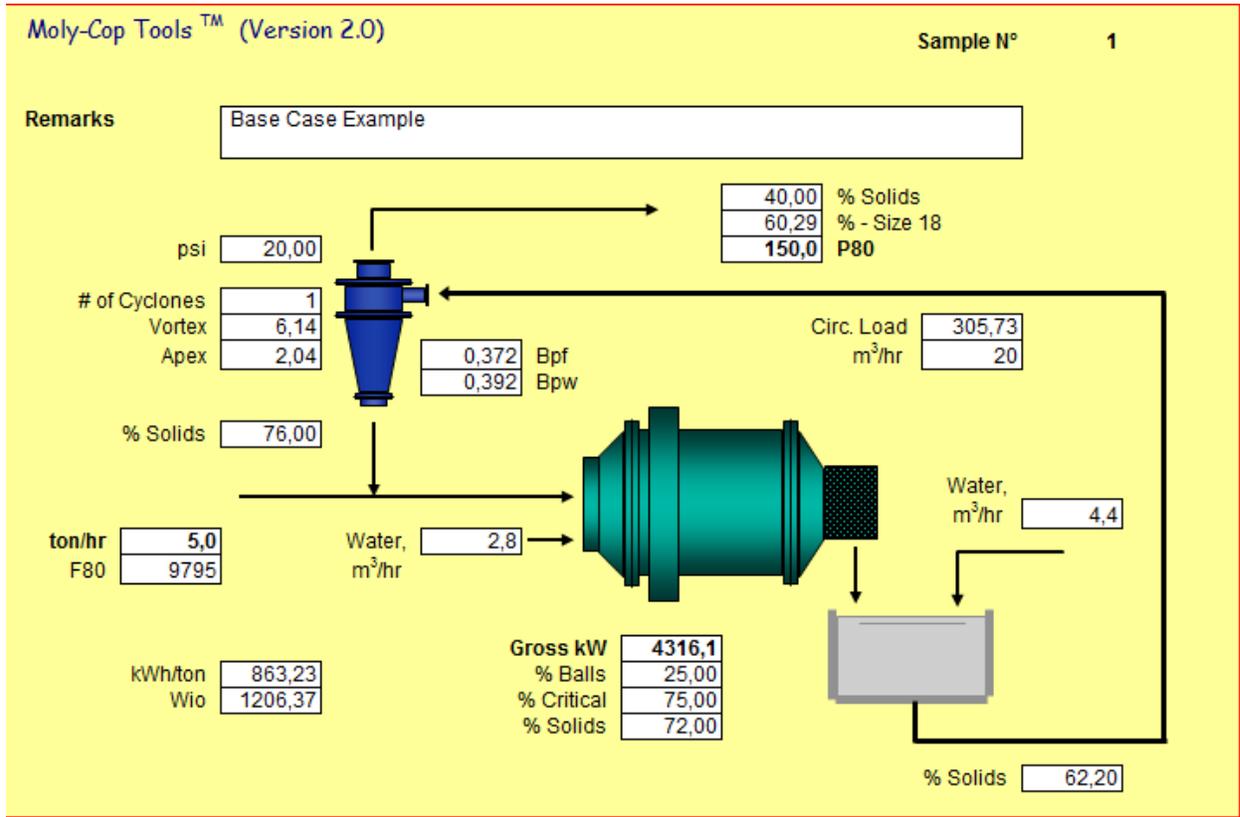
Modelos Hidrociclones									
	HC-125	HC-220	HC-280	HC-350	HC-500	HC-650	HC-800	HC-1000	HC-1200
Ø	125	220	280	350	500	650	800	1000	1200
Caudal m³/h	7/18	18/5 5	35/9 0	50/15 0	100/25 0	180/45 0	300/72 5	550/100 0	800/130 0
Toneladas/h	3	9	15	25	40	75	100	150	200
Corte medio	25/5 0	35/5 5	40/6 5	45/80	55/90	60/110	65/120	80/140	100/160

Fuente: <http://www.cribacero.com/hidrociclones.html>

En la figura 19 se observa el software moly-tools el cual permite determinar el valor de ciertas variables a tener en cuenta en el momento de clasificación del material las cuales son:

- Cantidad de agua que debe tener el tanque de almacenamiento: $4.4 \frac{m^3}{hr}$
- Porcentaje de solido que ingresa al tanque de almacenamiento: 62.20%
- Cantidad de agua que ingresa al molino de bolas: $2.8 \frac{m^3}{hr}$
- Porcentaje de solidos que se expulsa por el overflow del hidrociclón: 40%

Figura 19. Calculo de parámetros de circuito cerrado de molienda con el software moly-tools



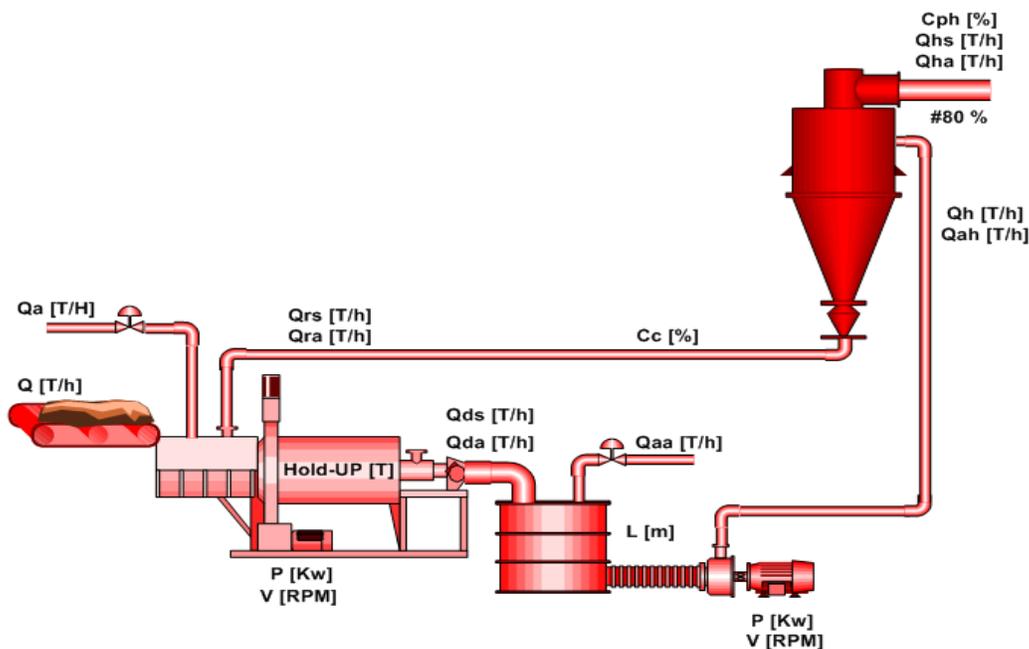
4. DISEÑO AUTOMATIZACIÓN DEL CIRCUITO DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN.

Al realizar la automatización del circuito de molienda, conformado por el molino de bolas, el hidrociclón y sus accesorios, es necesario tener en cuenta una serie de variables que de una u otra forma inciden directamente en la calidad del producto final (Granulometría del oro a la salida del hidrociclón). A continuación se presenta en detalle la lista de dichas variables algunas de las cuales es indispensable controlar para lograr el desempeño óptimo del circuito de molienda (ver figura 20):

- ◆ Q: flujo másico de sólidos en [T/h] en la alimentación del molino de bolas.
- ◆ Qa: flujo másico de agua en [T/h] en la alimentación del molino de bolas.
- ◆ Hold-up: Retención de material dentro del molino de bolas en [T].
- ◆ P: potencia consumida por el motor del molino de bolas en [KW].
- ◆ Qds: flujo másico de sólidos en [T/h] en la descarga del molino de bolas.
- ◆ Qda: flujo másico de agua en [T/h] en la descarga molino de bolas.
- ◆ Qrs: flujo másico de sólidos en [T/h] de rechazo al molino de bolas.
- ◆ Qra: flujo másico de agua en [T/h] de rechazo al molino de bolas.
- ◆ L: nivel del pozo en [m].
- ◆ Qaa: flujo másico de agua en [T/h] que es adicionada al pozo.
- ◆ V: velocidad de la bomba centrífuga en [RPM].
- ◆ Qh: flujo másico de sólidos en [T/h] en la alimentación a Hidrociclones.
- ◆ Qah: flujo másico de agua en [T/h] en la alimentación a Hidrociclones.
- ◆ Cph: porcentaje de sólidos en [%] en la alimentación a Hidrociclones.
- ◆ Qhs: flujo másico de sólidos en [T/h] en rebose de Hidrociclones.

- ♦ Q_{ha} : flujo másico de agua en [T/h] en rebose de Hidrociclones.
- ♦ #80: Porcentaje de partículas de oro malla 80 en [%] en rebose de Hidrociclones (Malla 80=173 μ m=0.173mm de diámetro).
- ♦ C_c : Carga circulante en [%].

Figura 20. Variables básicas para el funcionamiento del hidrociclón



Al realizar la automatización es necesario analizar inicialmente el grado de complejidad del proceso, los lazos de control que se es viable implementar para lograr un buen desempeño del proceso, las posibles alternativas que se pueden presentar para realizar el control, la instrumentación, los actuadores y el equipo mínimo requerido para realizar la automatización y los costos de la misma. Para el proceso de molienda que se analiza se proponen dos alternativas de control:

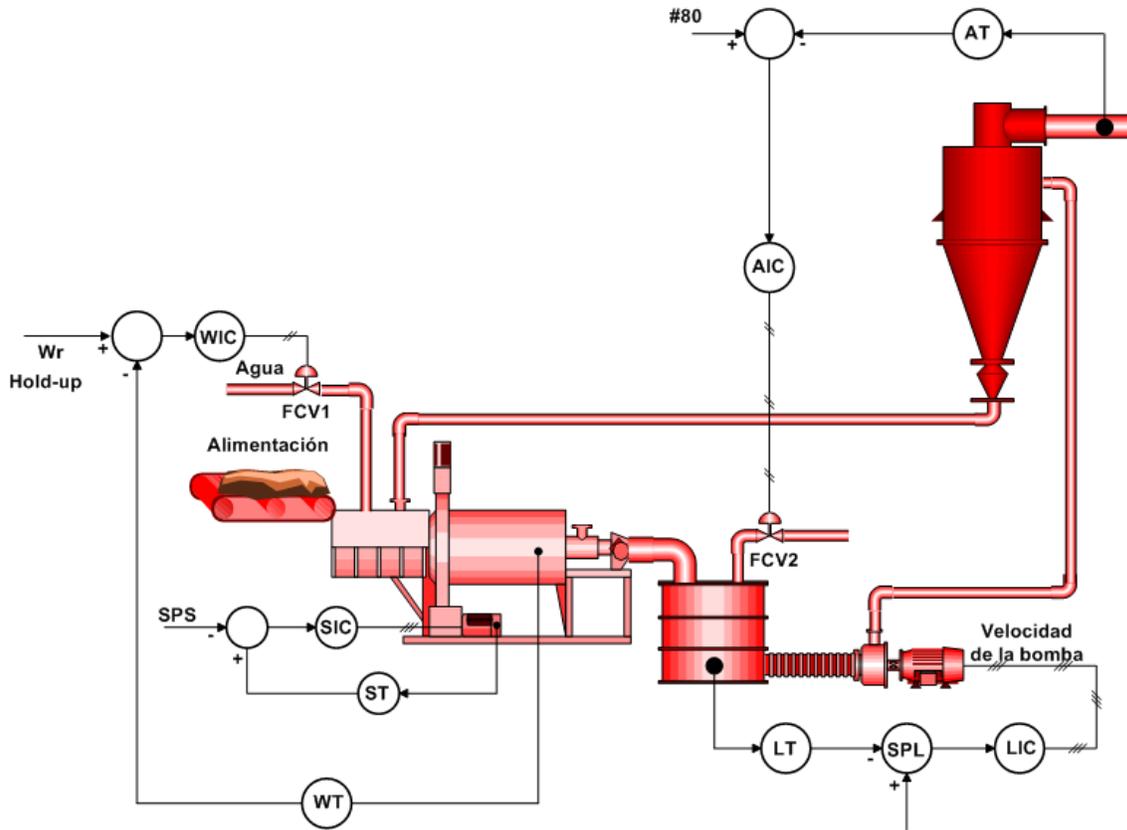
4.1 ALTERNATIVA 1

Comprende cuatro lazos de control (ver figura 21):

- ◆ Control PI de hold-up del Molino de bolas: este control actúa sobre la alimentación de agua al molino de bolas y tiene como finalidad mantener la carga constante dentro del molino.
- ◆ Control PI de nivel del Tanque: este control actúa sobre la velocidad de la bomba centrífuga que envía el material del tanque de almacenamiento del producto que sale del tanque hacia el hidrociclón. Se realiza a través de un variador de velocidad que compara la señal de un transmisor de nivel instalado en el tanque con el valor establecido como set-point.
- ◆ Control PI de malla # 80 en el producto final: Controla la granulometría del producto final que sale del hidrociclón, manipulando el flujo de agua hacia el tanque de almacenamiento ubicado a la salida del molino de bolas.
- ◆ Control de la velocidad de giro del molino: es un controlador PI implementado con un variador de velocidad que permite regular la velocidad del molino de bolas según los cálculos que arroja la estimación de la velocidad crítica.

Como esta alternativa posee una automatización muy completa del proceso, saldría muy costosa y no sería viable para minas de baja o mediana extracción ya que requiere de controladores especiales para la medición de cada una de las variables especificadas anteriormente, además se necesita un PLC el cual le entrega las señales que llegan a los controladores, por esto se optó por utilizar la alternativa 2, ya que brinda un control óptimo de las variables a un bajo costo.

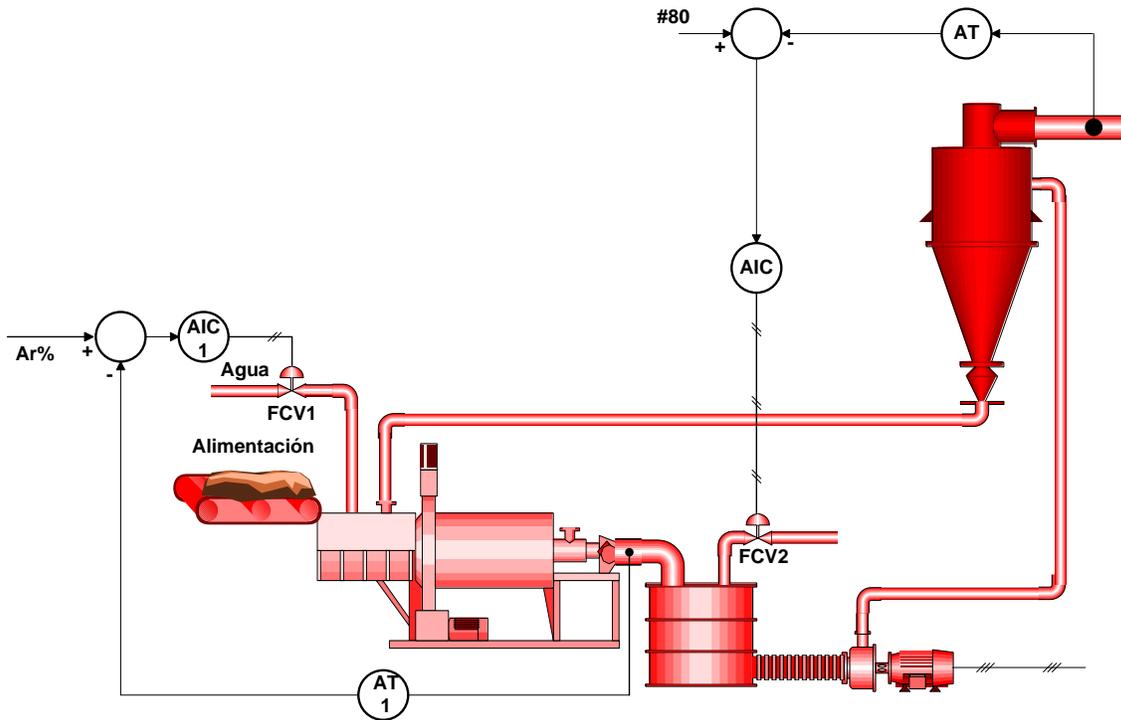
Figura 21. Opción de Automatización N° 1



4.2 ALTERNATIVA 2

En esta opción se tienen en cuenta dos lazos de control: uno en el sistema molidor (molino) y otro en el sistema de clasificación (hidrociclón), como se indica en la figura 22.

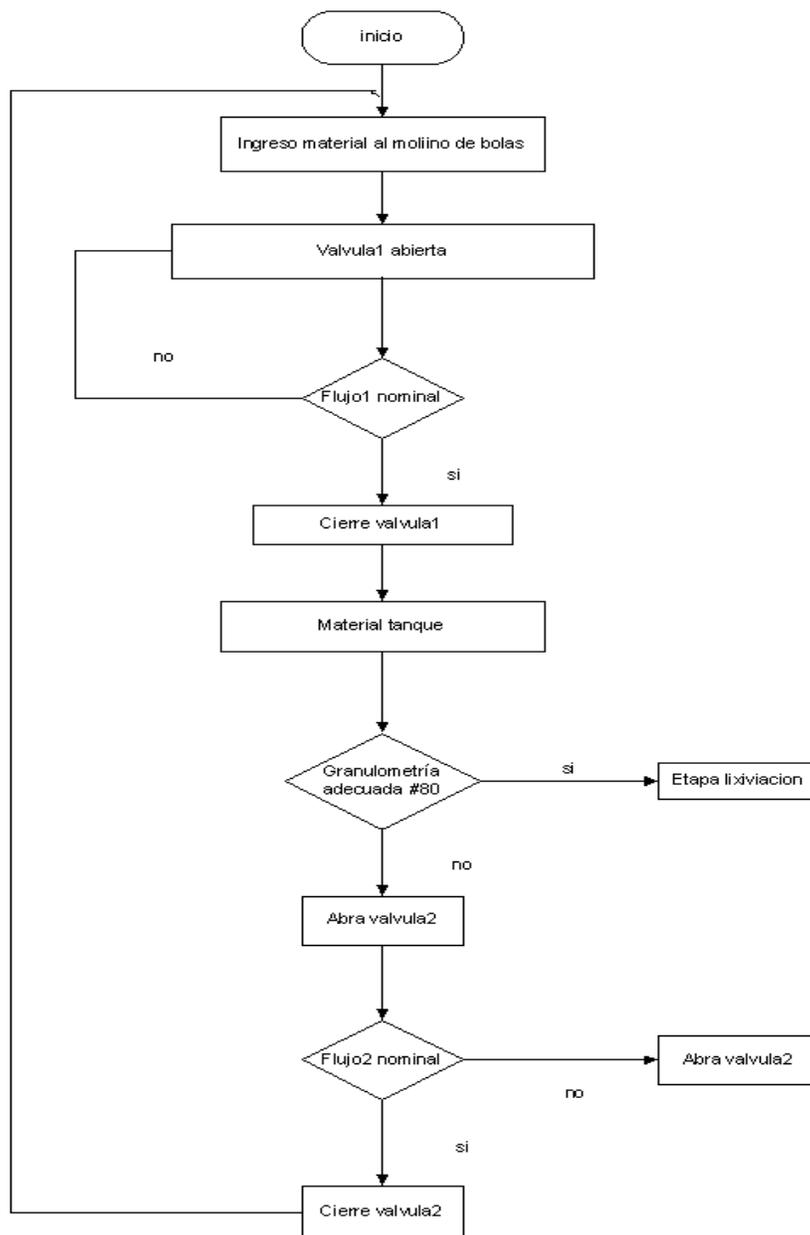
Figura 22. Opción de automatización N° 2



- ◆ Control PI de porcentaje de sólidos en el molino: se controla el porcentaje de sólidos dentro del molino tomando como variable manipulada el flujo de agua que entra al molino.
- ◆ Control PI de granulometría en el overflow: se controla la granulometría de salida en el overflow del hidrociclón expresada como un porcentaje de los sólidos por debajo de un valor determinado de malla, se toma para este caso malla #80 (partículas de diámetro menor a 0.173 mm) y se manipula el flujo de agua que va al tanque de salida del molino.

Las velocidades del molino y de la bomba que envía el producto del tanque hacia el hidrociclón se mantienen constantes en los valores estimados o calculados experimentalmente.

Figura 23. Diagrama de flujo de la alternativa 2



Para la sintonía de los controladores se sugiere utilizar el método de la curva de reacción propuesto por Ziegler y Nichols. Para el efecto se debe obtener la respuesta del molino de bolas y la respuesta del hidrociclón ante un estímulo en escalón, con el fin de obtener el modelo de estos equipos aproximándolo a un sistema de primer orden con retardo y realizar los ajustes de los controladores de acuerdo a los parámetros que establece el método de Ziegler-Nichols.

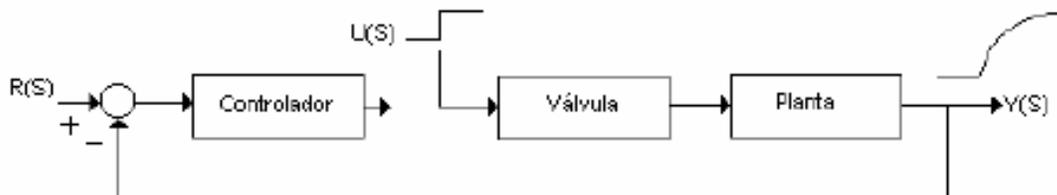
4.2.1 Modelo planta de primer orden con retardo. La función de transferencia correspondiente a una planta de primer orden con retardo está dada por la ecuación 12:

$$Gp(s) = \frac{k * e^{-\theta s}}{s * 1} \quad 12.$$

En donde K = ganancia de la planta, τ = constante de tiempo y θ = retardo o tiempo muerto.

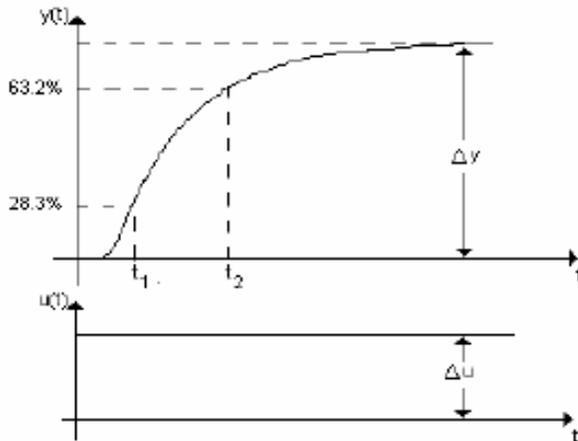
El procedimiento experimental para estimar el modelo consiste en abrir el lazo de control (llevando el controlador a manual) antes del elemento final de control y crear un pequeño y rápido cambio en escalón en el proceso. La respuesta del sistema se gráfica y sobre la curva obtenida se hace el análisis para estimar los valores de la ganancia (K) de la constante de tiempo (τ) y de el retardo (θ) del proceso. Para lograr lo anterior se procede así: Se determina el punto de operación del proceso y se aplica al sistema, en lazo abierto, un cambio en escalón de magnitud apropiada (ver figura 3.1). Esta operación se debe realizar varias veces, cubriendo toda la zona lineal del proceso, luego se promedian los valores obteniendo así una información confiable

Figura 24. Diagrama de Bloque.



En las curvas obtenidas como respuesta, se eligen dos puntos representativos. Por lo general, estos puntos son aquellos para los cuales la respuesta alcanza el 28.3% y el 63.2% de su valor final; estos puntos se presentan cuando los tiempos transcurridos a partir del momento de aplicación del escalón son respectivamente $\theta + \frac{\tau}{3}$ y $\theta + \tau$ (ver figura 3.2).

Figura 25. Curva de reacción para modelo POR.



Con los datos obtenidos en la gráfica 3.2 se plantean las ecuaciones 13 y 14:

$$\frac{\Delta y}{3} = t_1 \quad 13.$$

$$\Delta y = t_2 \quad 14.$$

t_1 y t_2 se leen directamente de las cartas que dan las gráficas o se estiman a partir de la base de datos. Resolviendo simultáneamente las ecuaciones 3.2 y 3.3 se estiman los valores de θ' y τ

El valor de la ganancia K , se obtiene mediante el cociente $\Delta Y/\Delta U$ que se interpreta como el cociente entre el cambio de la variable de salida y el cambio de la variable manipulada (valor del escalón de entrada), como se indica en la ecuación 15.

$$k = \frac{\lambda_y}{\lambda_u} \quad 15.$$

El modelo de la planta se obtiene reemplazando los valores de K y θ' en la ecuación 12.

4.2.2 Control Proporcional - integral (PI). En este tipo de controlador, la señal de salida experimenta un salto inicial proporcional al error actuante y a continuación presenta una variación gradual a una velocidad proporcional al error.

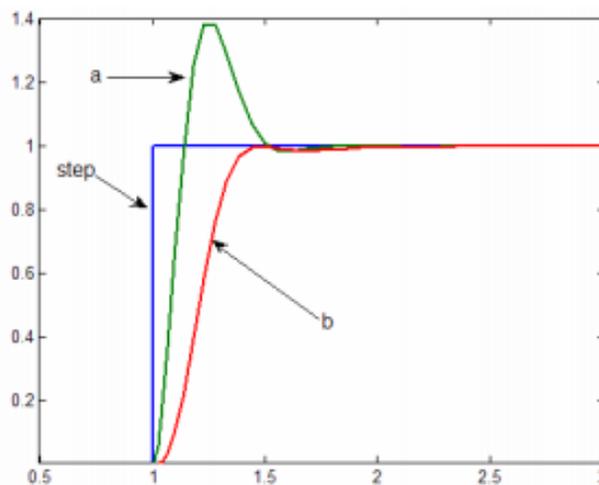
Las ecuaciones 16, 17 y 18 representan la función de transferencia de pulso del controlador PI.

$$D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{q_0 z + q_1}{z - 1} \quad \text{ecu 16.}$$

$$q_0 = K_c * \left[1 + \frac{T}{2T_i} \right] \quad \text{ecu 17.}$$

$$q_1 = -K_c * \left[1 + \frac{T}{2T_i} \right] \quad \text{ecu 18.}$$

Figura 26. RESPUESTA DE CONTROL PI ANTE UNA ENTRADA ESCALON CON RETARDO



Fuente: Control engineering II, diseño de sistemas de control, [online], pag 12.

4.2.3 Control PI por método de la curva de reacción. Además de las fórmulas para ajuste de controladores en línea, es decir, por el método de ganancia límite, Ziegler y Nichols propusieron otro método de ajuste de controladores asumiendo que la función de transferencia de lazo abierto de la planta se puede aproximar a un modelo de primer orden con retardo, obtenido a partir de la respuesta del sistema ante una entrada en escalón.

Entonces, aplicando la ecuación 12 (función de transferencia en lazo abierto):

$$Gp(s) = \frac{k * e^{-es}}{s * 1}$$

Los parámetros de ajuste del controlador se estiman a partir de la siguiente tabla, haciendo en ella $\theta = \theta' + T/2$, en donde $T/2$ es una aproximación correspondiente al retardo introducido por el muestreador y el retenedor y T es el período de muestreo.²⁵

Tabla 16. Ajustes de Ziegler-Nichols para el controlador $\theta = \theta' + T/2$

Controlador	K_c	T_i	T_d
P	$\frac{\tau}{k\theta}$	-	-
PI	$\frac{0.9\tau}{k\theta}$	3.33 θ	-
PID	$\frac{1.2\tau}{k\theta}$	2 θ	0.5 θ

Para una mejor demostración de un control PI por el método de Ziegler-Nichols se adquirió la función de transferencia (la respuesta del sistema ante una entrada escalón) del módulo de temperatura que se encuentra en el laboratorio de electrónica de la IUE, utilizando un software realizado en matlab el cual nos muestra gráficamente la respuesta del sistema y nos genera el tipo de control deseado, con el método que se desee trabajar

$$Gp(s) \square \frac{4.8437}{0.27813 \square 1}$$

²⁵ Ingeniero de Instrumentación y control Luis Eduardo Garcias

Figura 27. Modelo del Sistema POR

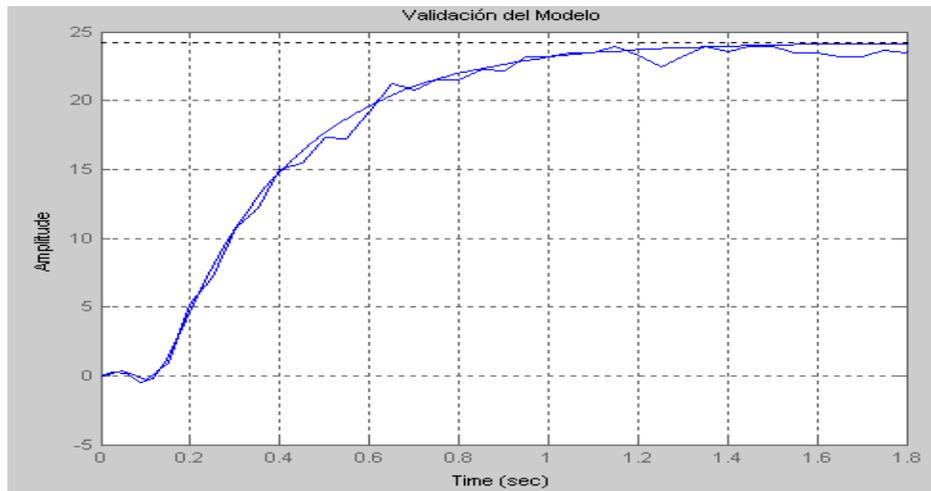
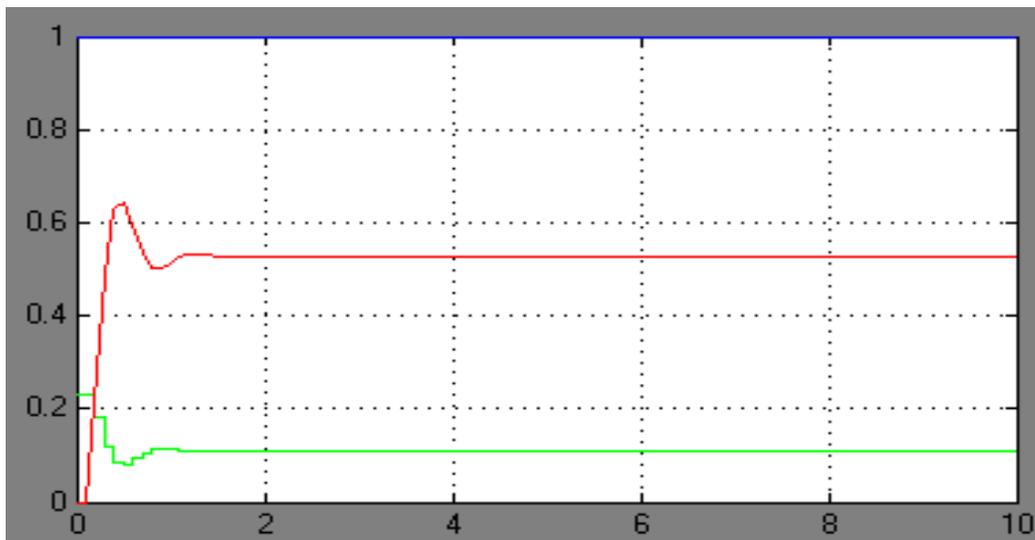


Figura 28. Control PI por Ziegler-Nichols



Función de transferencia de pulsos de un control PI por el método de Ziegler-Nichols

$$D(z) = \frac{0.22335z - 0.19022}{z - 1}$$

En el trabajo de grado no se presentan estos cálculos, pues para realizarlos es necesario tener el sistema montado y trabajando normalmente, además el alcance del trabajo solo contempla la automatización del sistema, incluyendo descripción de equipos, planos de instrumentación y análisis de los lazos de control necesarios para el diseño y montaje del sistema

Para la realización de un segundo trabajo de grado se puede realizar el cálculo de los controladores que requiere este proceso de molienda.²⁶

²⁶ Ingeniero en instrumentación y control Luis Eduardo Garcias.

5. ASPECTOS LEGALES A TENER EN CUENTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

Para el presente proyecto se considera las normas técnicas relacionadas con el diseño, supervisión técnica y construcción.

La propiedad intelectual de este proyecto pertenece en su totalidad a los autores del mismo.

El Ministerio de Minas y Energía y el MAVDT, adoptaron las guías minero-ambientales de exploración, explotación, beneficio y transformación, mediante la Resolución 18-0861 de 2002, las cuales constituyen un instrumento obligatorio de consulta y orientación, de, metodológico y procedimental, en lo pertinente al manejo de residuos peligrosos.

Para el desarrollo de la minería en general, el Ministerio de Minas y Energía (MME), expidió unas normas que regulan la ejecución de las actividades mineras. Estas normas se conocen como el **Código de Minas (Decreto - Ley 2655 de 1988)**. Con la expedición de este código se plantean los siguientes objetivos.

El Código de Minas regula las relaciones entre los organismos y entidades del Estado y de los particulares entre sí, sobre las actividades de prospección, exploración, explotación, beneficio, transporte, aprovechamiento y comercialización de los recursos no renovables que se encuentren en el suelo o subsuelo, así sean de propiedad de la nación o privada.

El MME señala las zonas en las cuales no se pueden desarrollar actividades mineras en concordancia con lo establecido en el Decreto 2811/1974. Estas zonas hacen referencia a las áreas de uso exclusivo para la agricultura y ganadería, las reservas ecológicas y las que presenten incompatibilidad para el desarrollo de la actividad.

En los artículos 16 y 17 del Código Minero se definen los títulos mineros, su clasificación y su utilidad. Así mismo se establecen tres clases de minería: pequeña, mediana y gran minería.²⁷

Otros reglamentos que completan el marco legal minero se relacionan a continuación.

²⁷ Upme, Marco Legal Minero, [online], Bogotá 2008.P.1

NORMA	TEMA	CONTENIDO
Decreto 1335/1987	Reglamento de Seguridad en las labores subterráneas	Establece disposiciones sobre la higiene y seguridad minera en las labores subterráneas.
Ley 141 de 1994	Creación del Fondo Nacional y de la Comisión Nacional de Regalías	Crea el Fondo Nacional de regalías, Comisión nacional de Regalías y regula el derecho del estado a percibir regalías por la explotación de los recursos naturales no renovables.
Decreto 2636/1994	Explotaciones de hecho de pequeña minería	Legaliza las explotaciones de hecho de la pequeña minería
Decreto 501/1995	Inscripción de los títulos mineros en el Registro minero	Reglamenta la inscripción en el registro minero de los títulos para la exploración y explotación de minerales de propiedad nacional.
Decreto 1184/1995	Forma de Pago del canon superficiario	Modifica la forma de pago del canon superficiario en un plazo de diez días siguientes a la inscripción del Registro minero.
Decreto 1385/1995	Mecanismos de conciliación.	Establece el mecanismo de conciliación para los eventos de superposiciones de áreas entre explotadores de hecho y títulos mineros otorgados.
Decreto 1481/1996	Requisitos para la inscripción títulos en el Registro minero.	Establece la obtención de la licencia ambiental para la inscripción de los aportes en el registro minero nacional.

6. PRESUPUESTO PARA LA IMPLEMENTACION DEL DISEÑO DE LA AUTOMATIZACION DEL PROCESO DE MOLIENDA.

6.1 Incremento de la producción

Semanas	Toneladas	Castellanos	Producido (US\$)
Primera	840	6720	US\$ 1,101,040.69
Segunda	1680	13440	US\$ 2,202,081.38
Tercera	2520	20160	US\$ 3,303,122.07
Cuarta	3360	26880	US\$ 4,404,162.76

Requerimientos de Inversión				
Máquinas y equipos	Cantidad	Unidad	Costo Unidad	Costo Total
Variador	Variadores	1	US\$6999	US\$6999
Molino de bolas	Molinos de bolas	1	US\$11846.15	US\$11846.15
Hidrociclón	Hidrociclones	1	US\$2000	US\$2000
Polea	Poleas	2	US\$ 546.15	US\$ 546.15
Motor	Motores	1	US\$2999	US\$2999
Controlador pi	Controladores	2	US\$3282	US\$3282

6.2 Análisis de proveedores, plan de compras.

Proveedor	Productos	Costo	Especificaciones generales
Ebay	Motor Baldor	US\$2999	50HP 3 Ph. AC Motor 1200RPM 230/460V M2544T
Hengchang	Ciclón de energía hidráulica	US\$2000	modelo FX660
Automatizaciones S.A	Controladores pi	US\$3282	Ziegler-Nichols
Zhengzhou Xinguang Mining Machinery Manufacturing	Molino de bolas	US\$11846.15	φ1200×3000
Siemens	variador	us\$6999	micromaster 440 simatic

Este presupuesto fue elaborado en base a la alternativa 2 del diseño de automatización de molienda y clasificación, y a la reducción de velocidad del molino por correas y poleas.

7. CONCLUSIONES.

El presente trabajo permite aplicar las bondades de la automatización con un proceso más eficiente de la etapa de molienda en la extracción mineralógica del oro.

Al realizar este diseño de automatización se optimizó el proceso de molienda aumentando así la productividad en la extracción mineralógica del oro, siguiendo los parámetros y cálculos adecuados para el mejoramiento y optimización de este proceso se hizo un control del tamaño (malla) del mineral, para mantenerlo constante, y así en el momento de la clasificación, realizada por el hidrociclón, solo las partículas con el tamaño requerido puedan ser expulsadas por el vortex del hidrociclón a la siguiente etapa.

En el trabajo se plantearon dos alternativas para el diseño de la automatización, las cuales proporcionan soluciones sencillas y complejas, variando así considerablemente el costo de la implementación, pero garantizando en ambas una obtención óptima del mineral. En la alternativa 1 (compleja) se analizaron cuatro lazos de control, los cuales controlan el ingreso del agua al molino de bolas, el nivel del tanque de almacenamiento, el tamaño del mineral y la velocidad del giro del motor. En cambio con la alternativa 2 (sencilla) solo se controlan dos lazos de control los cuales inspeccionan el tamaño del material deseado y el porcentaje de sólidos que se encuentran dentro del molino para evitar una sobre molienda.

Se optó por diseñar un circuito cerrado de molienda (molino-hidrociclón) en vía húmeda este proporciona una mejor pulverización del material y un desgaste menor del interior del molino, generando así una mayor duración de este, y una granulometría óptima a la salida del hidrociclón.

La automatización hace que el proceso de molienda sea más eficiente, confiable y estable, ya que se mantiene un control constante de todas las variables implícitas en el proceso de molienda como lo es el tamaño del mineral y la velocidad del molino de bolas, dando como resultado un mejor aprovechamiento del mineral.

Una mina que en promedio extrae un 70% de mineral auro argentífero con este tipo de automatización se garantiza que puede extraer hasta un 90%, aumentando así las ganancias en la empresa.

Se busca que la automatización del proceso de molienda esté al alcance de la mayoría de las minas en Colombia, permitiendo que estas tengan una mayor extracción del mineral con un costo moderado de la implementación.

8. RECOMENDACIONES

Si la descarga del molino es gruesa debido a que el material de alimentación es duro, es necesario ajustar la potencia del motor, reducir la cantidad de material que ingresa al molino y adicionar agua controladamente para que la densidad de la pulpa no sea baja.

En caso de que haya disminución de la capacidad de molienda por causa de cargar bolas desgastadas, se recomienda adicionar más bolas hasta compensar la carga. Si hay baja cantidad de sólidos, es necesario disminuir el suministro de agua.

Si el motor presenta caída de potencia a causa de sobrecarga del molino de bolas se debe parar la alimentación al molino y suministrar agua. Si en caso contrario hay potencia alta por dificultades mecánicas, se recomienda realizar una inspección de lubricación y daños mecánicos.

Para realizar un óptimo montaje y mantenimiento del molino se recomienda el alineamiento del tambor y de los elementos que lo soportan. Después de un periodo de funcionamiento se debe verificar el alineamiento de este.

9. BIBLIOGRAFIA.

CADAVID VELEZ, Carlos. GOMEZ VELASQUEZ, Luis. Diseño de un molino de bolas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín 1983.

CUEVAS. J., TORRES F. Diseño de Hidrociclón. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2010

FLOWER LEIVA, Luis. Controles y automatismos eléctricos. Séptima edición. Bogotá 2001

GARCIA JAIME, Luis Eduardo. Control digital teoría y practicas segunda edición. Politécnico Jaime Isaza Cadavid. Medellín 2009.

KATSUHIKO OGATA, Ingeniería de control moderno tercera edición. México 1998

CHAPMAN STEPHEN J, Maquinas eléctricas, Generadores eléctricos tercera edición. Bogotá 2000

Siemens, variadores, [online]. hurlingham buenos aires, 2007- [cited] Disponible en Internet: <<http://www.elec serrano.com.ar/siemens/variadores/mm440/index.php>>

El prisma, transmisión por correas, [online]. Asturias España, 2011- [cited] Disponible en Internet: <http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_mecanica/transmisioncorrea/default6.asp>

Eliopulossa, “tabla de potencias”. Disponible en Internet: <http://www.eliopulossa.com/productos/tabla_de_potencias/tabla_de_potencias.pdf>

Grupo Dreyfus, “Partes que componen al reductor”. Disponible en Internet <<http://www.carmorindustrial.com/pages/cyclo3.php>>

Tecnotrans s. a, “Elementos de transmisión mecánica”. Disponible en Internet: <http://www.tecnotrans.com/revista/INF_20.pdf>

Alibaba, Máquina de la minería aurífera molino de bola, [online]. China, 2011-[cited] Disponible en Internet: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/xinguang-gold-mining-machine-ball-mill-323750464.html>

Revista de metalurgia, “cementación de oro con polvo de zinc”. Disponible en Internet: <http://geco.mineroartesanal.com/tiki-download_wiki_attachment.php?attId=667>

Cribacero, hidrociclones, [online]. united kingdom Europa, 2011- [cited] Disponible en Internet: <<http://www.cribacero.com/hidrociclones.html>>

GARCIA, Antonio .PLC, [online]. Montana Estados Unidos, 2005- [cited] Disponible en Internet: <<http://www.uv.es/montanan/redes/trabajos/PLC.pdf>] 04/02/09>

CONICYT, “Sistemas de control optimizante para plantas de molienda”. Disponible en Internet: <<http://ri.conicyt.cl/575/article-10997.html>>

Ministerio de energía, chile. “Guía de asistencia técnica de EE en sistemas de tratamiento de materiales”. Disponible en Internet: <http://www.sistemasmotrices.cl/_pdf/Guia_Sistemas_Tratamiento_Materiales.pdf>

MARIA, Jesús. “Molino de bolas y barras para minería”. Disponible en Internet:<http://www.adoos.com.pe/post/3321373/molinos_de_bolas_y_barras_para_mineria__crusher>

Ministerio de minas y energía. Disponible en Internet: <www.minminas.gov.co/minminas/minas.jsp?cargaHome=2&opcionCalendar=4&id_noticia=589>

Alejandro Chávez, Aplicaciones de molienda fina, [online]. Perú, 2011-[cited] Disponible en Internet: http://www.infoindustriaperu.com/articulos_pdf/mineria/metalurgia/004.pdf

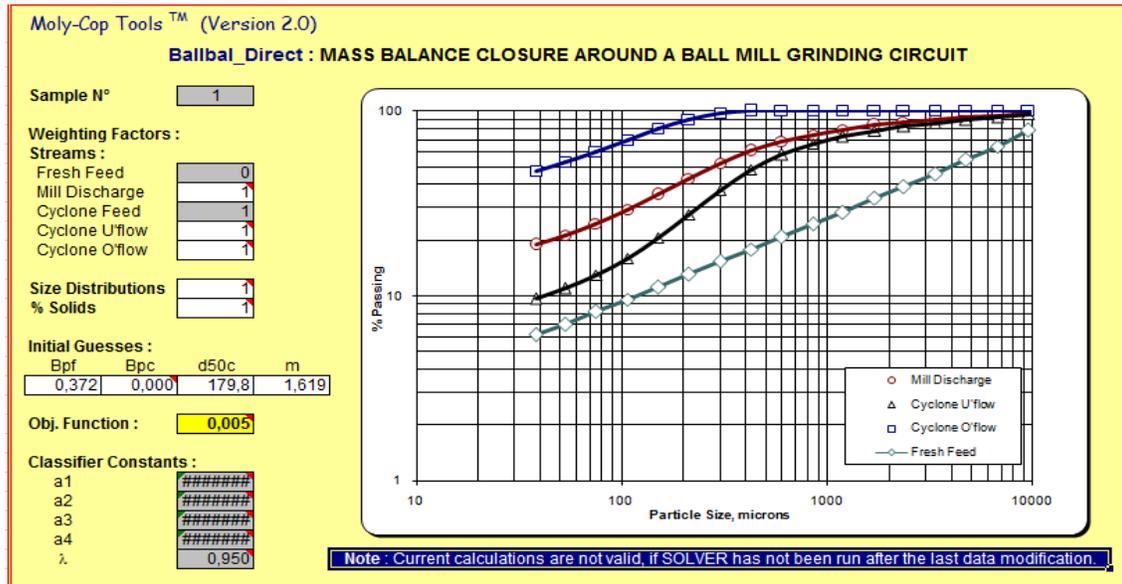
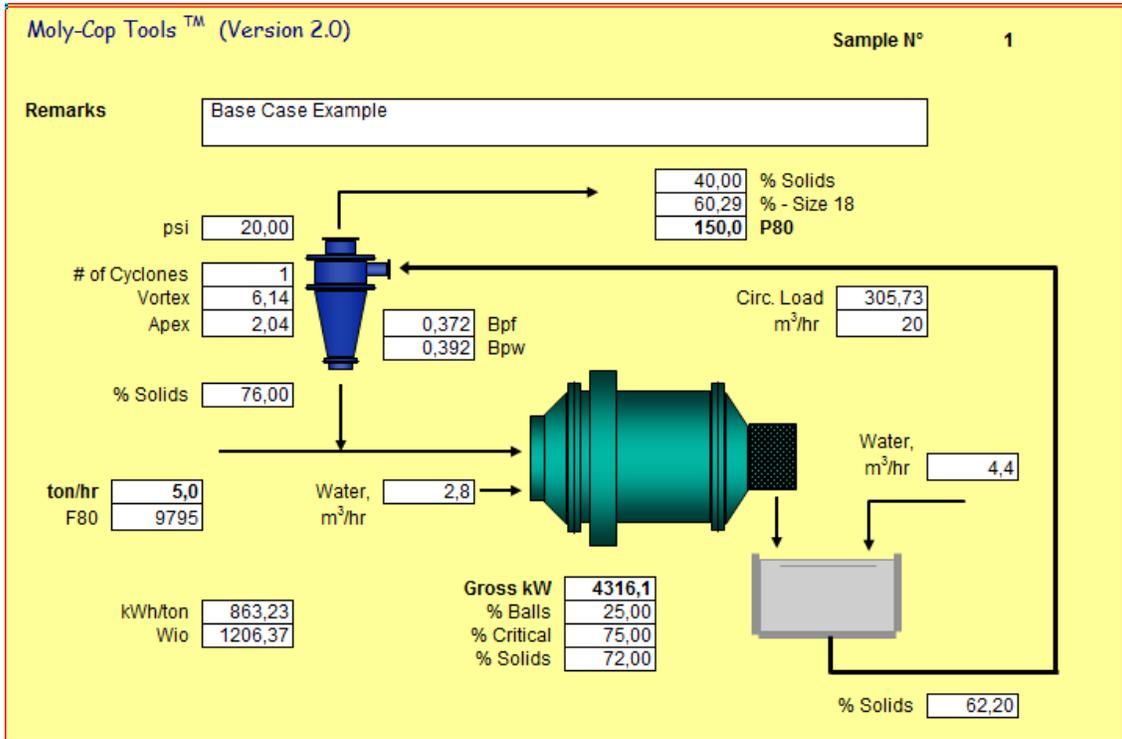
Shanghai Zenith Company, Molino de bolas, [online].China, 2010-[cited] Disponible en Internet: <http://www.china-crushers.es/product-Ball%20Mill.html>

Alipso, Molienda, [online]. Chile, 2009-[cited] Disponible en Internet: <http://www.alipso.com/monografias/molienda/>

ANEXO A

**CALCULOS SOFTWARE
MOLY-TOOLS**

CALCULOS SOFTWARE MOLY-TOOLS



Moly-Cop Tools™ (Version 2.0)

LYCLUSIM

Simulation N°

Remarks

of Cyclones

Cyclones Geometry, inches					
Diameter	Height	Inlet	Vortex	Apex	
30.7	32.1	4.37	6.14	2.04	

Operating Conditions : **Ore Density, ton/m³**

Cyclone Feed Conditions						
Dry Tons ton/hr	Water m ³ /hr	Slurry ton/hr	Flow m ³ /hr	Density ton/m ³	% Solids (by volume)	% Solids (by weight)
1622,84	986,16	2609,01	1565,75	1,666	37,02	62,20

Classifier Constants : *None Vertical Single Ballkil, Vertical Ballkil, Broomed*

a1	a2	a3	a4	λ	Bp (coarse)	
3,680	1,401	54,364	0,523	0,350	0,050	
#¡VALOR!	#¡VALOR!	#¡VALOR!	#¡VALOR!	0,350	0,000	<i>Default Values</i>

Feed Size Distribution :

i	Mesh	Opening	Mid-Size	ton/hr	% Ret	% Pass
1	1,05	25400	30206	0,00	0,00	100,00
2	0,742	19050	21937	0,00	0,00	100,00
3	0,525	12700	15554	18,17	1,12	98,88
4	0,371	9500	10984	41,43	2,56	96,32
5	3	6700	7978	40,76	2,51	93,81
6	4	4750	5641	37,01	2,28	91,53
7	6	3350	3989	36,53	2,37	89,16
8	8	2360	2812	44,14	2,72	86,44
9	10	1700	2003	51,21	3,16	83,28
10	14	1180	1416	66,38	4,13	79,16
11	20	850	1001	78,83	4,86	74,30
12	28	600	714	100,61	6,20	68,10
13	35	425	505	122,86	7,57	60,53
14	48	300	357	142,11	8,76	51,77
15	65	212	252	143,62	8,85	42,92
16	100	150	178	125,60	7,74	35,18
17	150	106	126	98,37	6,10	29,08
18	200	75	89	73,25	4,51	24,57
19	270	53	63	53,99	3,33	21,24
20	400	38	45	38,98	2,40	18,84
21	-400	0	19	305,76	18,84	0,00
Total				1622,84	100,00	

Uno de los programas de evaluación y simulación, que merece destacarse es el programa desarrollado por el Dr. Jaime Sepúlveda de la compañía Moly-Cop Chile, llamado **Moly-Cop Tools**.

Entre sus principales ventajas destaca el estar basado en hojas de cálculo Microsoft Excel de amplia difusión entre la comunidad minera, por lo que la comunicación del usuario con el programa resulta amigable y cómoda. Con la ayuda de este programa puede evaluarse fácilmente tanto una clasificación simple como un complejo circuito cerrado de molienda, en base a datos de la operación misma o bien de ensayos en laboratorio, pudiendo seguidamente simularse otras condiciones variando simplemente los parámetros convenientes, para tratar de optimizar el proceso. Esto permite en muchas ocasiones estimar las inversiones

necesarias para alcanzar determinados resultados sin necesidad de pruebas o ensayos costosos en planta.

Resaltar que para el manejo de este programa se requiere un adecuado nivel de conocimiento de los procesos involucrados, pues de lo contrario puede llegarse, a resultados aparentemente óptimos pero inalcanzables.

ANEXO B

ARTICULO DEL PROYECTO

