

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS PARA
ESTABILIZAR MERCURIO METÁLICO EN EL MARCO
DEL CONVENIO DE MINAMATA”**

Presentada por:

REIDER BENIGNO ZARATE SULCA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Lima – Perú

2022

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS PARA
ESTABILIZAR MERCURIO METÁLICO EN EL MARCO
DEL CONVENIO DE MINAMATA”**

Presentada por:

REIDER BENIGNO ZARATE SULCA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Ph.D. Lisveth Vilma Flores del Pino de Wright
PRESIDENTE

Dra. Rosemary Vela Cardich
MIEMBRO

Mg. Sc. Paola Aurelia Jorge Montalvo
MIEMBRO

Ph.D. Lizardo Visitación Figueroa
ASESOR

Mg. Sc. Lena Téllez Monzón
CO ASESORA

DEDICATORIA

Dedicado a aquellas 5 personas en el mundo que siempre estuvieron apoyándome, motivándome y enseñándome que con esfuerzo y dedicación todo es posible. Gracias Maribela, Glicerio, Héctor, Nelson y Yanina, los amo para siempre.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a mi familia por ser los pilares de mi formación y por haberme brindado el soporte emocional y económico que me permitieron finalizar con éxito esta etapa de mi vida.

Al Ph.D. Lizardo Visitación por haber confiado en mí y en mis capacidades académicas para el desarrollo de este proyecto.

A la empresa Tower & Tower que en la medida de sus posibilidades me han proporcionado su apoyo desde el primer día que visité la planta.

Y, a cada uno de mis amigos de la universidad con quienes compartí, aprendí y pasé los mejores años de mi vida, con especial cariño para Adolfo, Paula y Fernanda.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. El Mercurio	3
2.2. Toxicidad del mercurio en los seres humanos.....	3
2.3. Toxicidad del mercurio en el ambiente.....	4
2.4. El Potencial minero de producción de mercurio en el Perú	4
2.5. El Mercurio en la gran minería del oro	5
2.5.1. Proceso Merrill Crowe.....	6
2.6. El Mercurio en la minería aurífera artesanal	7
2.7. Marco regulatorio a nivel nacional e internacional	7
2.7.1. Convenio de MINAMATA.....	7
2.7.2. Ley General del Ambiente	8
2.7.3. Ley General de Salud	8
2.8. Estabilización de mercurio metálico.....	9
2.9. Protocolo TCLP.....	10
2.10. El Mercurio como residuo.....	10
2.11. Mecanismo de reacción.....	10
2.11.1. Condiciones termodinámicas de la reacción.....	12
2.11.2. Energía de activación	13
2.12. Trituradores y molinos	15
2.12.1. Clasificación de trituradores y molinos	15
2.13. Molino de bolas	17
2.13.1. Parámetros de diseño	17
2.13.2. Demanda de energía	19

2.13.3. Demanda de uso	21
2.13.4. Componentes.....	21
2.14. Materiales de construcción.....	21
2.14.1. Método de descarga.....	22
2.14.2. Tipo de Molienda	24
2.14.3. Grado de Molienda.....	24
2.14.4. Naturaleza del material	25
2.14.5. Tipos de material.....	25
2.15. Método de mínimos cuadrados.....	34
2.16. Equipos de Protección Personal para trabajos con mercurio	35
III. METODOLOGÍA.....	36
3.1. Cantidad Potencial de mercurio a tratar	36
3.2. Selección del equipo de Molienda.....	36
3.3. Dimensionamiento del Molino de Bolas.....	36
3.4. Parámetros de operación	38
3.5. Construcción del molino	38
3.6. Ensayos de Estabilización	39
3.7. Ensayos de TCLP	41
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1. Cantidad Potencial de mercurio a tratar	42
4.1.1. Potencial minero de producción de mercurio en el Perú	42
4.1.2. Mercurio residual como subproducto de la gran minería en el Perú	44
4.1.3. Mercurio retenido por contrabando en el Perú.....	46
4.2. Selección del equipo de Molienda.....	53
4.3. Dimensionamiento del Molino	55
4.3.1. Cálculo de la carga total de material	55
4.3.2. Cálculo del volumen del molino	56
4.3.3. Cálculo de las dimensiones del molino	56
4.3.4. Cálculo del material, tamaño, peso y número de bolas	57

4.4.	Parámetros de operación	62
4.4.1.	Velocidad de rotación	62
4.4.2.	Temperatura	63
4.4.3.	Presión	65
4.4.4.	Tiempo de operación	65
4.5.	Construcción del molino	65
4.5.1.	Elaboración de los planos	65
4.5.2.	Selección del material de construcción	65
4.5.3.	Selección del motor	66
4.5.4.	Construcción del molino y sus componentes.....	66
4.5.5.	Sistema de extracción de gases	67
4.6.	Ensayos de estabilización.....	68
4.6.1.	Preparación de los insumos.....	68
4.6.1.	Etapas de carga	68
4.6.2.	Etapas de operación	68
4.6.3.	Etapas de descarga.....	70
4.7.	Ensayo TCLP	71
V.	CONCLUSIONES	73
VI.	RECOMENDACIONES	74
VII.	BIBLIOGRAFÍA	75
VIII.	ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Potencial minero de producción de mercurio en el Perú (2011-2020).....	5
Tabla 2: Propiedades fisicoquímicas de las especies químicas del mercurio.....	9
Tabla 3: Energías de activación en función a sus constantes termodinámicas	14
Tabla 4: Composición química de los diferentes grados de aceros Hadfield.....	26
Tabla 5: Propiedades mecánicas de los aceros al manganeso (Hadfield)	26
Tabla 6: Composición Química Estándar de los aceros de Bajo Carbono Cr-Mo	27
Tabla 7: Propiedades Mecánicas de los Aceros de Bajo Carbono Cr-Mo	27
Tabla 8: Composición Química de los Aceros Perlíticos al Alto Carbono Cr-Mo	28
Tabla 9: Propiedades Mecánicas de los Aceros Perlíticos de Alto Carbono Cr-Mo.....	28
Tabla 10: Propiedades Mecánicas de los Aceros al Alto Carbono Cr-Mo	28
Tabla 11: Propiedades mecánicas del Acero al Alto Carbono Cr-Mo.....	29
Tabla 12: Composición Química de Ni-Hard y Mo solo en casos especiales.....	29
Tabla 13: Propiedades mecánicas de los Aceros Ni-Hard en sus tres grados	30
Tabla 14: Composición Química de Hierro Blanco al Alto Cromo	30
Tabla 15: Propiedades Mecánicas de las Fundiciones al Alto Cromo.....	30
Tabla 16: Composición Química de los diferentes grados de Hierro Blanco al Cr-Mo.....	31
Tabla 17: Dureza de los diferentes grados de Hierro Blanco al Cr-Mo.....	31
Tabla 18: Principales materiales utilizados para construir Molinos de Bolas y sus características.....	32
Tabla 19: Composición química del Acero ASTM A36.....	33
Tabla 20: Propiedades mecánicas del Acero ASTM A36.....	33
Tabla 21: Composición química del Acero galvanizado	33
Tabla 22: Propiedades mecánicas del Acero galvanizado	33
Tabla 23: Proyección del potencial de producción de Mercurio en el país para el 2019-2030.....	43

Tabla 24: Proyección de la cantidad de mercurio residual generado por la gran minería en el Perú (2011 – 2030).....	45
Tabla 25: Principales rutas y cantidad de exportación de mercurio	47
Tabla 26: Proyección de la cantidad de mercurio que ingresa al país por el contrario-bando	51
Tabla 27: Estimación y proyección de la oferta de mercurio en el Perú entre los años 2011-2030.....	52
Tabla 28: Costo de trituradoras y molinos	54
Tabla 29: Bolas de acero forjado de alto carbón	58
Tabla 30: Peso promedio de bola de acero.....	59
Tabla 31: Resumen de valores utilizados para el dimensionamiento del molino.....	60
Tabla 32: Parámetros de diseño para el tiempo de contacto	64
Tabla 33: Temperatura externa del molino durante la etapa de operación	69
Tabla 34: Velocidad de rotación del molino (RPM).....	70
Tabla 35: Insumos utilizados en cada ensayo.....	71
Tabla 36: Resultados del ensayo TCLP	72
Tabla 37: Potencial Anual de Producción de mercurio según la USGS	88
Tabla 38: Valores para el desarrollo de la ecuación de regresión - USGS	88
Tabla 39: Proyección del potencial de producción de Mercurio para el 2019-2030.....	89
Tabla 40: Producción anual de oro en gramos finos refinados según el MINEM.....	90
Tabla 41: Valores para el desarrollo de la ecuación de regresión - MINEM.....	91
Tabla 42: Proyección de la producción de Oro para el 2019-2030	92
Tabla 43: Proyección de la cantidad de mercurio residual generado por la gran minería.....	93
Tabla 44: Proyección de la cantidad de mercurio que ingresa al país por contrario-bando	94
Tabla 45: Traje de PVC de cuerpo completo desechables	109
Tabla 46: Máscara respiradora de Cara Completa Reutilizable 3M-6000.....	110
Tabla 47: Cartucho para vapores de mercurio.....	111

Tabla 48: Botas de seguridad para trabajos químicos.....	112
Tabla 49: Casco de seguridad.....	113
Tabla 50: Orejeras para montaje en casco de seguridad.....	114
Tabla 51: Protectores auditivos.....	115
Tabla 52: Guantes Químicos de nitrilo.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mecanismo de reacción del Mercurio y el Azufre	11
Figura 2: Estructura del α -HgS cinabrio rojo	11
Figura 3: Estructura del β -HgS metacinabrio negro	12
Figura 4: Diagrama de fases de sulfuro de mercurio	13
Figura 5: Descomposición térmica del metacinabrio (HgS)	13
Figura 6: Energía de activación del metacinabrio	14
Figura 7: Trituradora de Quijadas.....	15
Figura 8: Trituradora de martillos.....	16
Figura 9: Molino de Bolas.....	16
Figura 10: Molino Planetario de bolas.....	17
Figura 11:Desplazamiento de bolas en la velocidad de rotación adecuada	18
Figura 12: Diagrama de variación de la temperatura durante una reacción mecano- química (reducción del Fe ₃ O ₄ con Zr)	19
Figura 13: Parámetros geométricos que involucran el impacto entre dos bolas	20
Figura 14: Estructura de un molino de bolas.....	21
Figura 15: Descarga libre o de desbordamiento (Overflow).....	22
Figura 16: Descarga de periferia central	23
Figura 17: Descarga de diafragma o rejilla	23
Figura 18: Diagrama de Flujo de la etapa de Dimensionamiento.	37
Figura 19: Diagrama de Flujo de la etapa de Construcción	39
Figura 20: Diagrama de Flujo del proceso de Ensayos preliminares de estabili- zación	40
Figura 21: Resumen del potencial de producción de Mercurio en el Perú (2011-2030)	42
Figura 22: Proyección de la cantidad de mercurio residual producto de la gran minería en el Perú (2011-2030)	46

Figura 23: Disminución de la importación de Mercurio por el Perú desde México (2012-2018)	48
Figura 24: Incremento de la importación de Mercurio por Bolivia desde México (2012-2018)	49
Figura 25: Evolución de la cantidad de Importaciones desde México hacia Perú y Bolivia	49
Figura 26: Evolución de la cantidad de mercurio que ingresa al país por el contrario- bando	51
Figura 27: Proporcionalidad de crecimiento del oro y el mercurio	93
Figura 28: Proporcionalidad de crecimiento del oro y el mercurio de contrabando	95

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Potencial de producción de mercurio en el país	87
Anexo 2: Cantidad de mercurio residual generado por la Gran Minería	90
Anexo 3: Cantidad de mercurio que ingresa al Perú por contrabando	94
Anexo 4: Informe de Ensayo TCLP - SGS	96
Anexo 5: Plano del molino de bolas – vista frontal.....	98
Anexo 6: Plano del molino de bolas – vista lateral izquierda	98
Anexo 7: Plan del molino de bolas – vista posterior	99
Anexo 8: Plano del condensador y chiller – vista frontal	99
Anexo 9: Planos del condensador y el filtro de carbón – vista lateral derecha.....	100
Anexo 10: Plano del chiller – vista lateral izquierda.....	100
Anexo 11: Tambor del molino – estructura externa	101
Anexo 12: Tambor del molino – estructura interna.....	101
Anexo 13: Tambor y carcasa del molino	102
Anexo 14: Estructura de conexión entre el tambor del molino y el motor	103
Anexo 15: Compuerta de alimentación y descarga	104
Anexo 16: Motor del Molino.....	104
Anexo 17: Estructura de soporte del molino de bolas	105
Anexo 18: Sistema mecánico de elevación tipo “Gata”.....	105
Anexo 19: Campana de Extracción	106
Anexo 20: Condensador de gases	106
Anexo 21: Filtro de carbón activado.....	107
Anexo 22: Chiller.....	107
Anexo 23: Tuberías de conexión entre la campana y el condensador	108
Anexo 24: Equipos de protección personal (EPPs)	109

RESUMEN

La presente investigación realizó el diseño y construcción de un molino de bolas con el objetivo de estabilizar eficientemente el mercurio metálico como sulfuro de mercurio, de tal forma que pueda ser dispuesto en forma segura en un relleno de seguridad reduciendo sus impactos en la salud humana y al ambiente. Para el diseño del molino se estimó la oferta máxima de mercurio a tratar; se seleccionó el equipo de molienda más adecuado; se dimensionó el molino; se identificaron los parámetros óptimos de operación. La oferta de mercurio anual se estimó en 282 toneladas a partir del análisis de las tres fuentes principales de generación, que son: el mercurio residual de la gran minería, el mercurio decomisado por contrabando y el potencial minero de producción. El equipo de molienda fue seleccionado a partir de un análisis comparativo de costos y tecnología entre los equipos de trituración y molienda más comunes del mercado, resultando el molino de bolas el óptimo. Las dimensiones del molino fueron estimadas a partir de los criterios establecidos para el cálculo de la carga total del material que incluyeron la relación carga/bolas de 1/10, una capacidad máxima de carga del 25% y una reacción entre el azufre y mercurio en condiciones estequiométricas. Los parámetros de operación como la velocidad de rotación, temperatura, presión y tiempo de operación fueron estimados a partir de los criterios propuestos por diversos autores quienes han realizado experiencias similares con casos de éxito. Se realizaron tres ensayos de estabilización y se determinó la eficiencia del molino mediante ensayos TCLP, donde los resultados preliminares mostraron concentraciones de mercurio en el lixiviado de entre 0,082 a 1,633 mg/L, con lo cual se concluye que el molino diseñado y construido bajo los parámetros estimados y calculados tiene un buen potencial para estabilizar el mercurio metálico.

Palabras clave: Molino de bolas, Estabilización de mercurio, Sulfuro de mercurio, TCLP.

ABSTRACT

The present research carried out the design and construction of a ball mill with the main objective of efficiently stabilizing metallic mercury as mercuric sulfide, so it can be safely disposed in a security landfill, decreasing its impacts on human health and the environment. For the mill design, the maximum quantity of mercury to be stabilized was estimated; the most appropriate milling equipment was selected; the mill was sized, and the proper operation parameters were identified. The quantity of mercury offered per year was estimated at 282 tonnes based on the analysis of the three main sources of generation residual mercury: large-scale mining, confiscated from smuggling mercury and the mining production potential. The grinding equipment was selected based on a comparative analysis of costs and technology among the most common crushing and grinding equipment on the market, resulting in the ball mill as the optimum. The mill dimensions were estimated from the criteria established for the calculation of the total charge of the material, which included a charge/ball ratio of 1/10, a maximum charge capacity of 25% and a reaction between sulfur and mercury under stoichiometric conditions. The operational parameters such as rotation speed, temperature, pressure, and time were estimated based on the criteria proposed by several authors who have carried out similar experiences with successful cases. Three stabilization tests were carried out, and the mill efficiency was determined by TCLP tests. The preliminary results showed mercury concentrations in the leached ranging from 0.082 and 1.633 mg/L, which concludes that the mill designed and built under the estimated and calculated parameters has a good potential to stabilize metallic mercury.

Keywords: Ball mill, Mercury stabilization, Mercury sulfide, TCLP.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el continuo incremento de las emisiones de mercurio metálico en el ambiente ha llegado a preocupar a las autoridades de todo el mundo debido a que pese a las iniciativas de reducción que se han ido adoptando en muchos países, como la suscripción al Convenio de Minamata, estos valores no han disminuido.

De ahí que, en el año 2015, la Evaluación Mundial del Mercurio indicó que como producto de la actividad antropogénica se emitieron a la atmósfera aproximadamente 2 200 toneladas de mercurio, lo cual superó en un 20% lo generado en el año 2010 (PNUMA, 2018). Al mismo tiempo, estudios recientes determinaron que, de esta cantidad, el 95% se encuentra en suelos, un 3% en aguas y un 2% en la atmósfera. (Gaona, 2004).

Sumado a esto, Gupta et al. (2018) señala que aproximadamente el 80% de todo el mercurio liberado al medio ambiente es mercurio metálico y las fuentes principales de generación son actividades antrópicas como la combustión de combustibles fósiles, la minería, la fundición y la incineración de residuos sólidos. Asimismo, de estas actividades, la minería aurífera artesanal y a pequeña escala representan el 38% del total de las emisiones mundiales y es la principal fuente de emisiones en América del Sur (PNUMA, 2018).

En el Perú, las principales fuentes de generación de mercurio metálico están asociadas al mercurio generado como subproducto de la gran minería aurífera, el mercurio por contrabando retenido y usado principalmente en la minería ilegal artesanal y a pequeña escala, y al potencial minero del país para producir mercurio; estimándose una generación total aproximada de 282 toneladas anuales.

El principal problema de este metal pesado radica en que una vez que ingresa al ambiente como contaminante, es sumamente nocivo, debido a su alta movilidad¹, persistencia², capacidad para formar compuestos orgánicos, bioacumulación³ y biomagnificación⁴. Las

¹ Movilidad: Capacidad de transportarse a través de la atmósfera largas distancias.

² Persistencia: Capacidad de resistir a la degradación y permanecer en el ambiente por muchos años.

³ Bioacumulación: Capacidad de ingresar a un ser vivo y acumularse en tejidos y órganos.

⁴ Biomagnificación: Capacidad de aumentar su concentración a medida que asciende en la cadena trófica.

afectaciones a la salud por exposición (incluso en cantidades mínimas) incluyen alteraciones permanentes en el sistema nervioso, daños a nivel renal, digestivo, pulmonar y de la piel (OMS, 2017).

De lo anterior se evidencia que, para hacer frente al aumento de la concentración de mercurio tanto en el Perú como en el mundo, es necesario no solamente adoptar medidas normativas para el uso, generación y comercialización de este elemento, sino también implementar medidas tecnológicas que permitan inmovilizarlo y así evitar su transferencia entre los diferentes medios terrestres, acuáticos y aéreos.

En consecuencia, el presente trabajo pretende reducir la extensión del mercurio metálico en el ambiente, mediante el diseño y construcción de un molino de bolas para estabilizar este elemento como sulfuro de mercurio, el cual es su estado menos soluble y volátil. Para ello se dimensionará el molino de acuerdo con la oferta de mercurio en el país en los capítulos 3.1 y 3.2; se evaluarán y seleccionarán los parámetros óptimos de operación en el capítulo 3.3; y finalmente se determinará la eficiencia del equipo en el capítulo 3.4.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El Mercurio

Es un elemento natural que en el medio ambiente puede existir en distintas formas, ya sea en forma elemental (metálico), inorgánico u orgánico. Según Gupta et al. (2018), aproximadamente el 80% de todo el mercurio liberado al medio ambiente es mercurio metálico y las fuentes principales de las cuales proviene, son actividades humanas como la combustión de combustibles fósiles, la minería, la fundición y la incineración de residuos sólidos.

El mercurio metálico en forma pura se asemeja a una sustancia líquida de color blanco y gris y brillante a temperatura ambiente. Es usado principalmente en termómetros, barómetros, dispositivos para medir la presión arterial, baterías de botón, interruptores eléctricos, amalgamas dentales, etc. (Gupta et al., 2018).

También es ampliamente usado en la minería artesanal y a pequeña escala ya que es un insumo indispensable para el proceso de separación del oro, a través de la formación de una aleación conocida como amalgama (Esdaile & Chalker, 2018)

2.2 Toxicidad del mercurio en los seres humanos

Según Gupta et al. (2018) dependiendo del nivel y tiempo de exposición al mercurio metálico, los efectos en el ser humano pueden manifestarse en un corto o largo plazo. Es decir, a corto plazo se manifiestan mediante signos y síntomas inmediatos como náuseas, vómitos, diarrea, aumento de la presión arterial y/o del ritmo cardiaco, irritación de los ojos y erupciones cutáneas.

Por otro lado, los efectos a largo plazo están relacionados con la acumulación de este elemento en el tejido humano. Gupta et al. (2018) nos menciona que el 80% del mercurio metálico se absorbe en los pulmones, mientras que en el tracto intestinal se absorbe muy poco. Esto debido a que es un elemento extremadamente volátil, lo cual hace que su ingreso al cuerpo sea principalmente por inhalación.

Una vez que el mercurio metálico ingresa al sistema circulatorio, se distribuye rápidamente en diferentes tejidos, llegando a acumularse en mayor cantidad en los riñones Gupta et al. (2018).

Debido a su alta lipofilia, el mercurio metálico también tiene la capacidad de atravesar con facilidad la barrera hematoencefálica, por lo que también tiende a acumularse en el cerebro, pero en menor cantidad (Gupta et al., 2018).

De estos órganos sensibles, el más afectado es el riñón, ya que se generan fallas a nivel renal cuyas complicaciones pueden darse en mayor o menor intensidad, dependiendo del nivel de exposición (Gupta et al., 2018).

Con respecto a los daños cerebrales, estos se intensifican a medida que más joven es la persona, debido a que el mercurio afecta procesos exclusivos del sistema nervioso en desarrollo, como la migración y división celular. Esto genera cambios degenerativos en el cerebelo, lo cual está relacionado con muchas de las disfunciones motoras (Gupta et al., 2018).

2.3 Toxicidad del mercurio en el ambiente

El mercurio elemental como tal, es poco o casi nada reactivo al encontrarse en el ambiente. Sin embargo, cuando este elemento interactúa con microorganismos u otros compuestos que se encuentran en la atmósfera (p. ej. los halógenos) es capaz de oxidarse y convertirse en un compuesto biodisponible. Es decir, que tendrá la capacidad de ingresar y acumularse en los tejidos de humanos, animales y plantas. (Von Glasow & Crutzen, 2014).

Por lo tanto, la toxicidad del mercurio en el ambiente dependerá mucho del estado de oxidación, el medio y la concentración en la que se encuentra. Ya que estas condiciones determinarán su facilidad para ingresar en la cadena alimentaria y generar problemas a la salud del hombre por consumo de plantas y animales contaminados. (Von Glasow & Crutzen, 2014).

2.4 El Potencial minero de producción de mercurio en el Perú

Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (2019), el Perú, pese a no contar con minas de mercurio, tiene un potencial de producción de mercurio significativo que se sustenta en el hecho de que antiguamente existía una mina de mercurio en la ciudad de Huancavelica llamada Santa Bárbara, y cuya producción la posicionaba en el cuarto lugar

en el ranking mundial. Esta dejó de funcionar en los años 90; sin embargo, todavía se mantiene vigente su gran potencial. A continuación, se muestra el potencial minero de producción de mercurio en el Perú de los últimos 10 años.

Tabla 1: Potencial minero de producción de mercurio en el Perú (2011-2020)

Año	Toneladas de Mercurio
2011	35
2012	40
2013	45
2014	40
2015	35
2016	40
2017	40
2018	40
2019	40
2020	40

FUENTE: USGS, 2011 - 2020

2.5 El Mercurio en la gran minería del oro

El Mercurio se genera como subproducto del procesamiento de minerales de cobre, oro, plomo-zinc y plata. Por ejemplo, en la mina Yanacocha, el mineral de oro y plata, que también contiene mercurio, se muele y lixivía con cianuro para separar los metales presentes en este. La solución rica formada por la cianuración pasa a través de un proceso de precipitación con Zinc para recuperar todo el oro mediante una técnica conocida como Merrill-Crowe. Este proceso libera grandes cantidades de condensados de mercurio que generalmente son exportados a los Estados Unidos para su tratamiento (Servicio Geológico de Estados Unidos [USGS], 2006).

2.5.1 Proceso Merrill Crowe

Esta técnica cumple un rol indispensable dentro del proceso de recuperación del oro en la gran minería junto con la lixiviación con cianuro.

El proceso de recuperación de oro se inicia con la formación de la solución rica, mediante la lixiviación del mineral con cianuro. Esta solución rica pasa a un tanque de agitación herméticamente cerrado en donde se le adiciona Zinc en polvo y Acetato de plomo para precipitar los metales valiosos, incluyendo al mercurio (Del Valle, 2006).

Este proceso es conocido como Merrill Crowe y se desarrolla mediante las siguientes etapas:

- a) Clarificación
- b) Precipitación
- c) Adsorción en carbón activado
- d) Desorción del oro del carbón activado

Durante la precipitación los átomos de oro aceptan un electrón y son reducidos del estado de oxidación (+1) al estado de oxidación metálico (0), mientras que los átomos de zinc donan dos electrones y son oxidados del estado metálico (0) al estado de oxidación (+2). Esto debido a la presencia de una diferencia de potencial superior a 0.5 V que reflejaría la existencia de una gran fuerza impulsora termodinámica que ocasiona que la reacción de precipitación proceda (Misnaza et al., 2006)

Este proceso también afecta a otros complejos metálicos de cianuro como el mercurio y la plata ya que tienen una diferencia de potencial con el zinc mucho más alta que la del oro (Salas, 2017).

Esta diferencia de potencial entre el oro, la plata o el mercurio y el zinc, promueven la ocurrencia de un reemplazo electroquímico del metal por zinc, tal y como se muestran en las siguientes reacciones de precipitación (Salas, 2017).

- $2\text{Au}(\text{CN})_2^-(\text{ac}) + 2\text{Zn}(\text{s}) + 4\text{CN}^- + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \leftrightarrow 2\text{Au}(\text{s}) + 2\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}(\text{ac}) + \text{H}_2^-(\text{g}) + \text{OH}^-$
- $2\text{Ag}(\text{CN})_2^-(\text{ac}) + 2\text{Zn}(\text{s}) + 4\text{CN}^- + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \leftrightarrow 2\text{Ag}(\text{s}) + 2\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}(\text{ac}) + \text{H}_2^-(\text{g}) + \text{OH}^-$
- $\text{Hg}(\text{CN})_4^-(\text{ac}) + 2\text{Zn}(\text{s}) + 4\text{CN}^- + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \leftrightarrow \text{Hg} + 2\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}(\text{ac}) + \text{H}_2^-(\text{g}) + 2\text{OH}^-$

2.6 El Mercurio en la minería aurífera artesanal

Alrededor del mundo, la minería del oro artesanal y en pequeña escala representa la mayor fuente de emisiones de mercurio elemental. Según la evaluación mundial del mercurio del 2018, se ha estimado que la minería aurífera artesanal y de pequeña escala es responsable de aproximadamente el 38% del total de las emisiones de mercurio mundiales y supone la principal fuente de emisiones en Sudamérica. (PNUMA, 2018)

Esto se debe a que muchas de las prácticas realizadas para extraer el oro del mineral, no cumplen con los protocolos de seguridad y manipulación necesarios que garanticen que este elemento se mantenga confinado; lo cual genera fugas por lixiviación, volatilización, etc. que generan grandes impactos en la salud de los trabajadores mineros, los ecosistemas y las comunidades cercanas (PNUMA, 2008).

Siguiendo con la idea, la técnica más utilizada a nivel mundial para separar el oro del mineral en la minería artesanal es el proceso de amalgamación. Este consiste en utilizar mercurio metálico, el cual es un ligando altamente fuerte, para atrapar al oro en el mineral y formar una aleación conocida como amalgama. Durante este proceso, se usa una gran cantidad de mercurio, aproximadamente entre 3 y 50 unidades por unidad de oro recuperado (Esdaile & Chalker, 2018; OMS, 2017).

La amalgama formada luego es calentada con mecheros o incluso cocinas domésticas hasta evaporar todo el mercurio y obtener el oro puro. Durante esta etapa todo el vapor de mercurio se emite al aire, generando impactos en la salud y el medio ambiente. (Esdaile & Chalker, 2018; OMS, 2017).

2.7 Marco regulatorio a nivel nacional e internacional

1.1.1. Convenio de MINAMATA

El Convenio de Minamata sobre el mercurio, fue establecido el año 2013 en Japón con la finalidad de elaborar un plan de medidas para proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones antropogénicas de mercurio. (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2016)

El artículo 7 de este Convenio indica que los países donde se desarrollan actividades de minería artesanal y a pequeña escala (ASGM) tienen la obligación de tomar medidas para reducir y eliminar en lo posible el uso de mercurio en sus actividades.

El Perú firmó este Convenio el 10 de octubre de 2013 mediante la Resolución Legislativa n°30352 y lo ratificó en noviembre de 2015 mediante el Decreto Supremo No 061-2015-RE. Con esta suscripción, el país comenzó a tener un control más estricto en el comercio interno y externo de este elemento. (MINAM, 2016).

El año 2019 se aprobó el Plan Nacional de Aplicación del Convenio de MINAMATA sobre el Mercurio mediante D.S. N°004-2009-MINAM mediante la cual se propusieron actividades para la reducción y/o eliminación del uso de mercurio en el país.

En la actualidad, la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT) ha implementado diferentes mecanismos de control del comercio de mercurio como producto químico fiscalizado, tales como el establecimiento del sistema de registro de proveedores y consumidores, el diseño de rutas fiscales y un mayor flujo de información entre importadores y exportadores (MINAM, 2016).

2.7.1 Ley General del Ambiente

Artículo 83.- Del control de materiales y sustancias peligrosas

83.1. Las empresas adoptan medidas para el efectivo control de los materiales y sustancias peligrosas intrínsecas a sus actividades, debiendo prevenir, controlar, mitigar eventualmente, los impactos ambientales negativos que aquellos generen. (Congreso de la República, 2017).

83.2. El Estado adopta medidas normativas, de control, incentivo y sanción, para asegurar el uso, manipulación y manejo adecuado de los materiales y sustancias peligrosas, cualquiera sea su origen, estado o destino, a fin de prevenir riesgos y daños sobre la salud de las personas y el ambiente (Congreso de la República, 2017).

2.7.2 Ley General de Salud

Artículo 96.-

En la importación, fabricación, almacenamiento, transporte, comercio, manejo y disposición de sustancias y productos peligrosos deben tomarse todas las medidas y precauciones necesarias para prevenir daños a la salud humana, animal o al ambiente, de acuerdo con la reglamentación correspondiente. (Congreso de la República, 1997).

Artículo 97.-

Cuando la importación, fabricación, transporte, almacenamiento, comercio y empleo de una sustancia o producto se considere peligroso para la salud de la población, el Estado debe establecer las medidas de protección y prevención correspondiente.

2.8 Estabilización de mercurio metálico

La estabilización del mercurio metálico tiene como objetivo reducir su liberación al ambiente por procesos de evaporación, debido a su alta presión de vapor. Del mismo modo, busca evitar fugas al suelo o al agua donde se puede disolver o biotransformar en mercurio orgánico, incrementando su solubilidad, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades fisicoquímicas de las especies químicas del mercurio

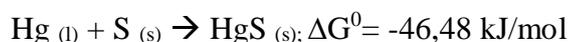
Propiedades Fisicoquímicas	Hg	HgCl₂	HgS	Hg₂Cl₂
Temperatura de fusión °C	-38,8	277	386-583	400-500
Temperatura de ebullición °C	356,72	302	No data	384
Densidad g/mL	13,5	5,4	7.55	7,15
Solubilidad (g/mL)	5,60E-08	0,03	Insoluble	2,00E-06
Presión de vapor (mmHg a 25 °C)	2,00E-03	1	No datos	No data
Log Kow	5,95	No data	No data	No data

FUENTE: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, (1999).

Para lograr la estabilización se busca transformar el mercurio metálico en su forma menos soluble o volátil, según diversos autores esta sería, el sulfuro de mercurio.

El mejor proceso para obtener el sulfuro de mercurio involucra la reacción entre el mercurio metálico con el azufre en polvo, esta reacción forma el sulfuro de mercurio negro

denominado metacinnabrio. La reacción es termodinámicamente favorecida y presenta un valor de energía libre de Gibbs (ΔG^0) de -46,48 kJ/mol (Gorin et al. 1994). Esto se observa en las siguientes reacciones:



(618 < T < 1093, K) (0.5 < P < 2, GPa) (Sharma et al. 1993)

2.9 Protocolo TCLP

Este es un método establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) de numeral 1311, para determinar la movilidad de analitos orgánicos e inorgánicos presentes en desechos líquidos, sólidos y multifásicos. Como tal, permite estimar el contenido de mercurio residual lixiviable en el producto final de un proceso de estabilización y a su vez la eficiencia del proceso. [Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. (EPA), 2015].

2.10 El Mercurio como residuo

La NSW-EPA de Australia establece en la Waste Classification Guidelines (Directrices de clasificación de residuos) que la clasificación de los residuos debe ser establecida por evaluación química para descartar si se tratan de residuos peligrosos o no. Esta evaluación química se realiza utilizando el Protocolo TCLP, la cual establece que la concentración de mercurio en un lixiviado para ser considerado como residuo sólido general, debe ser menor a 0,2 mg/L.

2.11 Mecanismo de reacción

El mecanismo de reacción entre el mercurio y azufre elemental para la formación de sulfuro de mercurio es complejo debido a que el azufre elemental es una mezcla de alótropos principalmente formado por anillos de 8, con trazas de moléculas de 6, 7 y 9 átomos de azufre. Se ha determinado que el mercurio reacciona con los isómeros de S_n en forma espontánea con liberación de energía y que la velocidad de reacción con moléculas de S_n ramificadas es mucho mayor en comparación con moléculas de S_n cíclicas. El orden de enlace de Mayer a lo largo de la vía de reacción podría caracterizar cuantitativamente la

formación de enlaces Hg-S y rotura de enlaces S-S (Sun et al. 2020), como se observa en la Figura 1.

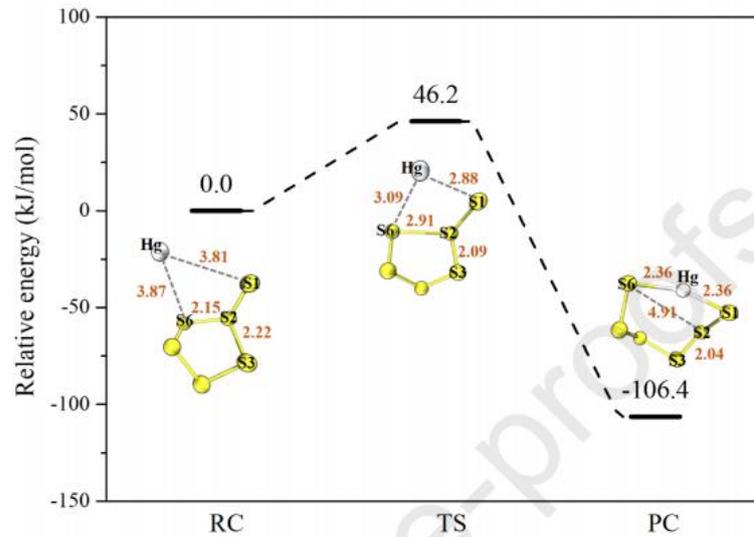


Figura 1: Mecanismo de reacción del Mercurio y el Azufre.
FUENTE: Sun et al. (2020)

Las formas más comunes de sulfuro de mercurio son el α -HgS cinabrio rojo y el β -HgS metacinabrio negro, siendo el más estable el cinabrio rojo y el metacinabrio es considerado como metaestable. (Dickson & Tunell 1959). La presencia de metales como el hierro, zinc o selenio en la estructura del metacinabrio retarda el paso del metacinabrio a cinabrio. La estructura química del metacinabrio es de forma cubica tetraédrica, mientras que el cinabrio es trigonal romboédrico tal y como se muestran en la Figura 2 y Figura 3.

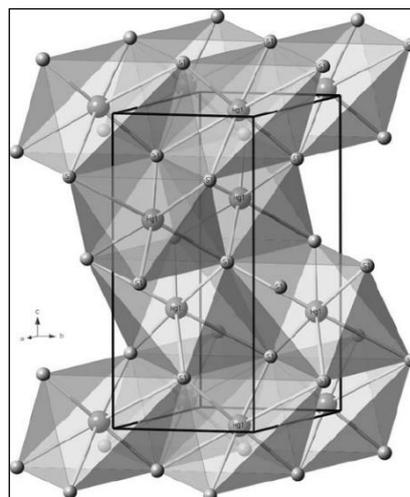


Figura 2: Estructura del α -HgS cinabrio rojo.
FUENTE: Ballirano et al. (2013)

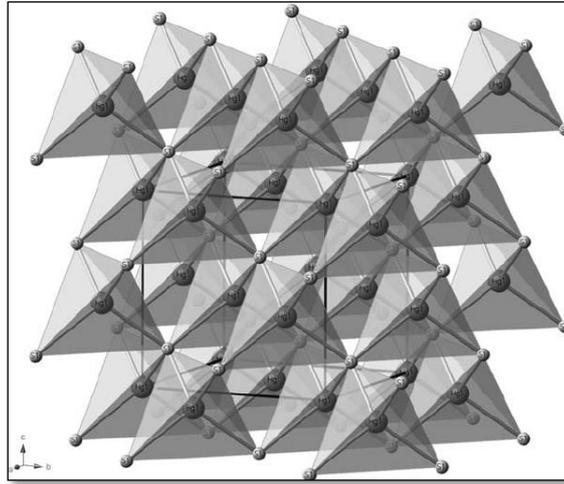


Figura 3: Estructura del β -HgS metacinabrio negro.
FUENTE: Ballirano et al. (2013)

2.11.1 Condiciones termodinámicas de la reacción

La reacción de formación del sulfuro de mercurio negro como β -HgS metacinabrio: $\text{Hg(l)} + \text{S(s)} \rightarrow \beta\text{-HgS (s)}$ presenta las siguientes magnitudes termodinámicas:

La entalpia de formación del sulfuro de mercurio negro como β -HgS metacinabrio es $\Delta H^\circ = -46,48 \text{ kJ/mol}$, lo cual indica que es una reacción exotérmica (Madelung et al., 1999)

La energía libre de Gibbs para la formación de metacinabrio es favorable lo cual hace que la reacción sea espontánea y se puede determinar mediante la ecuación 01 (Madelung et al., 1999).

$$\Delta G^\circ [\text{J mol}^{-1}] = -44823 - 71,380 \times T + 13,513 \times T \times \ln T$$

(618 K < T < 1093 K) . . . Ecuación (01)

La presión de vapor que genera el sulfuro de mercurio y su diagrama de fases se presenta en la Figura 4. Se observa que el metacinabrio β -HgS negro a temperaturas entre 800 – 850 °C y presiones hasta 2 GPa se encuentra en fase sólida y por encima de esta temperatura se funde o sublima.

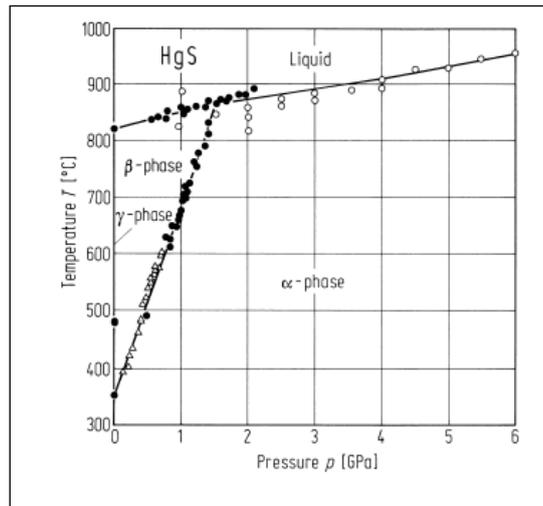


Figura 4: Diagrama de fases de sulfuro de mercurio.
FUENTE: Madelung et al. (1999)

Por otro lado, el metacinabrio se descompone en función de la temperatura $\text{HgS (s)} \rightarrow \text{Hg (vap)} + \text{S (gas)}$, incrementando la presión de vapor de la mezcla y alcanzando valores de 1,45 mmHg a 331,5 °C hasta 2385 mmHg a 651 °C (Rinse 1928, Dickson & Tunell 1959), como se observa en la Figura 5.

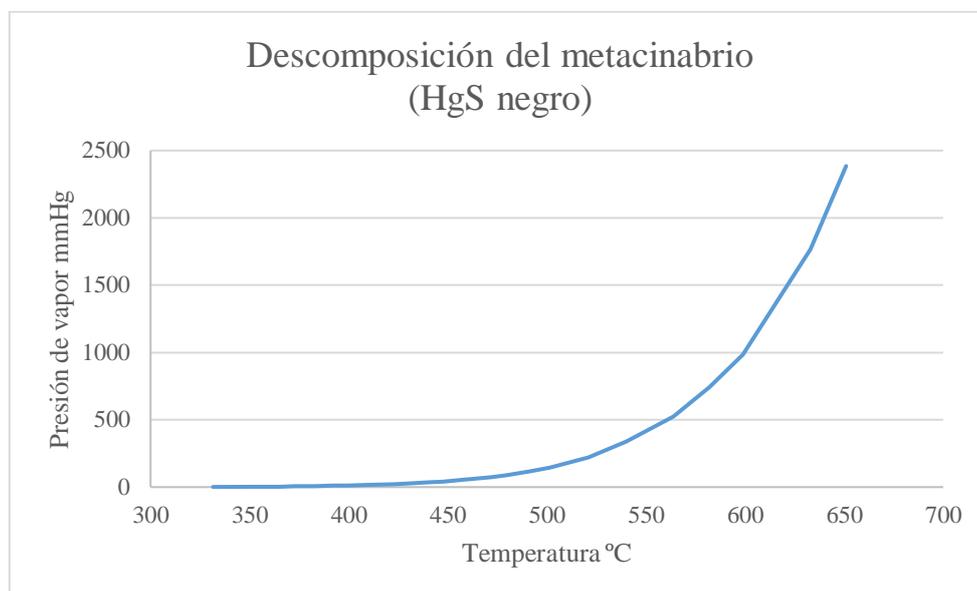


Figura 5: Descomposición térmica del metacinabrio (HgS).
FUENTE: Adaptado de Dickson & Tunell (1959)

2.11.2 Energía de activación

La descomposición térmica del sulfuro de mercurio tiene una energía de activación 230,12 kJ/mol (Leckey & Nulf, 1994) y un valor de entalpia de formación de -49,3712 kJ/mol.

Además, se muestra que la energía de activación de la reacción de formación es de 180,75 kJ/mol, como se observa en la Figura 6.

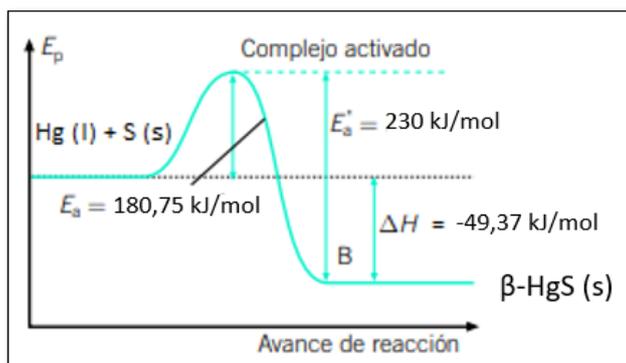


Figura 6: Energía de activación del metacinnabrio.
FUENTE: Leckey & Nulf, 1994

La energía de activación de la reacción del mercurio con el S_n ($n = 6 - 9$), toma valores diferenciados, para las moléculas ramificadas toman valores de 27,2 kJ/mol a 60,67 kJ/mol mientras que las formas cíclicas presentan valores de 160,91 kJ/mol a 184,43 kJ/mol. Los cálculos fueron desarrollados en forma teórica por Sun et al. (2020), como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3: Energías de activación en función a sus constantes termodinámicas

S_n	E_a
Ramificados	kJ/mol
S-6	32,45
S-7	55,99
S-8	72,62
S-9	59,05
Anillos	
S-6	202,7
S-7	192,3
S-8	214,99
S-9	220,4

FUENTE: Sun et al. 2020

2.12 Trituradores y molinos

Los trituradores y molinos son equipos especialmente diseñados para reducir el tamaño del material que ingresa a valores que sean de utilidad para otros procesos. Durante el proceso de reducción de tamaño se genera calor por fricción de los componentes, el cual puede ser aprovechado para la realización de algunas reacciones químicas.

2.12.1 Clasificación de trituradores y molinos

2.12.1.1 Trituradora de quijadas

Son equipos formados por dos platos trituradores inclinados uno con respecto al otro, formando una apertura horizontal en la parte baja de los bordes. El material es triturado entre un plato fijo y otro movable por presión recíproca hasta que el tamaño de partícula sea lo suficientemente pequeño como para pasar por la abertura de la parte baja, como se observa en la Figura 7. Este equipo es muy adecuado para triturar material frágil (Neikov, 2009), por su diseño no libera grandes cantidades de energía.

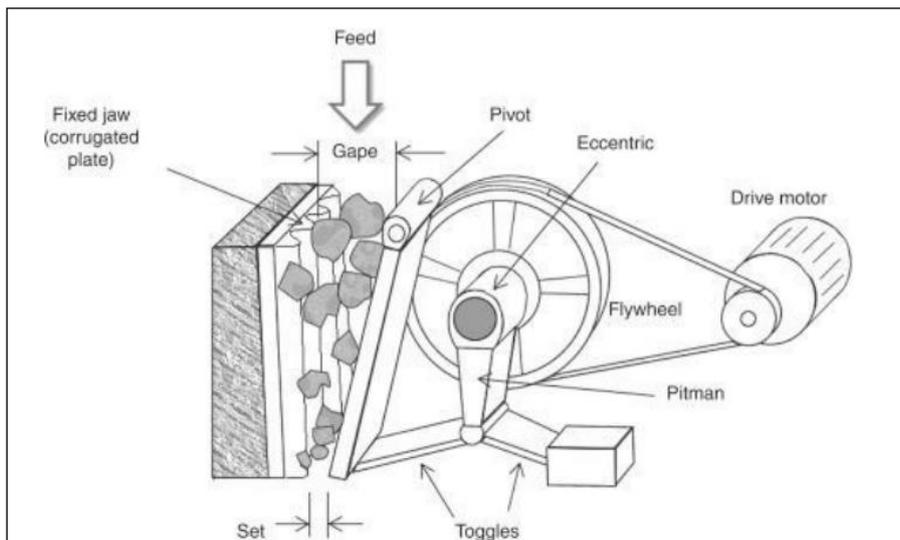


Figura 7: Trituradora de Quijadas.
FUENTE: Legendre y Zevenhoven (2014)

2.12.1.2 Trituradora de martillos

Son utilizados como trituradores primarios de un paso o como trituradores secundarios para productos de una pre triturados. Se utilizan ampliamente para triturar chatarra de metales duros, consta de martillos pivotantes pendulares, montados en los ejes horizontales ubicados simétricamente a lo largo del perímetro de un rotor. La trituración se realiza por el impacto de piezas de material con los martillos móviles de alta velocidad y por el contacto con placas

rompedoras (Neikov 2009), como se observa en la **Figura 8**. El tamaño del producto se puede regular cambiando el espaciado de las barras de la rejilla o la apertura de la pantalla. Este tipo de triturador no libera grandes cantidades de energía.

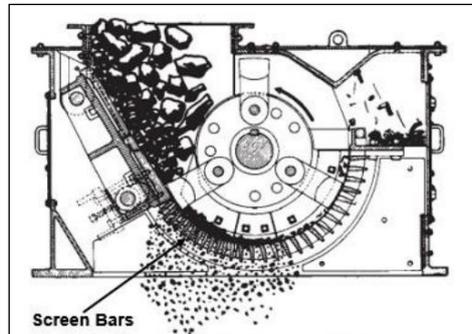


Figura 8: Trituradora de martillos.
FUENTE: Shah (2018)

2.12.1.3 Molino de bolas cilíndrico

Los molinos de bolas se utilizan ampliamente en sistemas húmedos y secos; operaciones continuas y por lotes; escalas pequeñas y grandes. Los elementos de molienda de los molinos de bolas se mueven a diferentes velocidades, por lo tanto, la fuerza de colisión, dirección y energía cinética entre dos o más elementos varían mucho dentro de la carga de la bola. El desgaste por fricción o las fuerzas de fricción actúan sobre las partículas, así como la energía de colisión. Estas fuerzas se derivan del movimiento de rotación de las bolas y del movimiento de partículas dentro del molino y zonas de contacto de bolas en colisión (Neikov 2009), como se observa en la Figura 9. En este tipo de equipo se liberan grandes cantidades de energía que pueden ser aprovechados para el desarrollo de reacciones que requieren una energía de activación moderada.

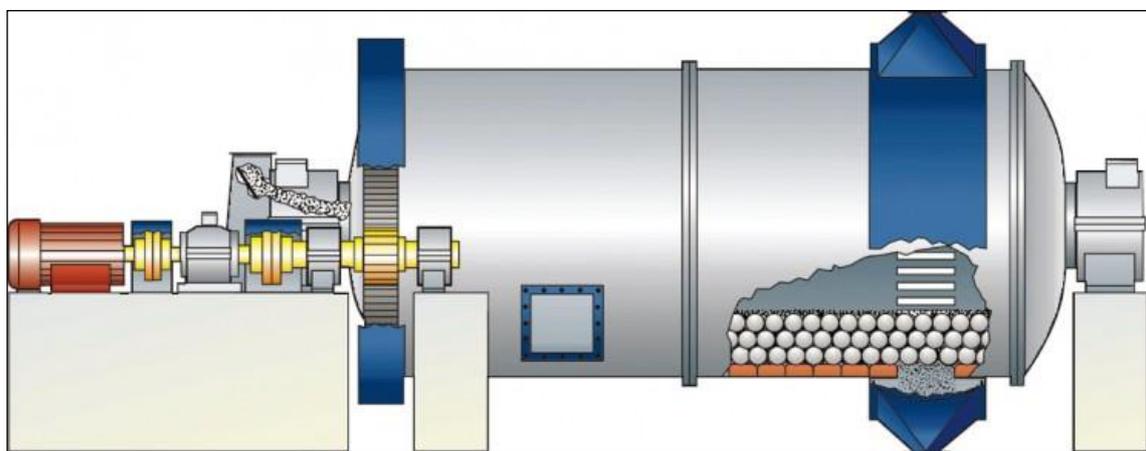


Figura 9: Molino de Bolas.
FUENTE: Hosokawa Micrón Corporation (2020)

2.12.1.4 Molino planetario

Un molino planetario consta de un disco base y ollas de molino giratorias. Los materiales ingresados en este equipo se muelen por la gran fuerza centrífuga generada durante la revolución y la rotación. Con respecto a la intensidad de la aceleración, esta se puede aumentar hasta 150 g, en la escala de la aceleración gravitacional (Neikov 2009).

Durante su funcionamiento, la olla que contiene los medios de molienda gira alrededor de dos ejes paralelos separados. Un brazo planetario de radio R_p está centrado en un punto alrededor del cual gira a velocidad angular, ω_{pl} . La olla con radio r_p gira (generalmente en la dirección opuesta al brazo planetario) con velocidad angular ω_p (Neikov 2009), como se observa en la Figura 10. Este tipo de molino libera gran cantidad de energía que puede ser utilizada para la realización de reacciones. Por lo general son utilizados a nivel de laboratorio.

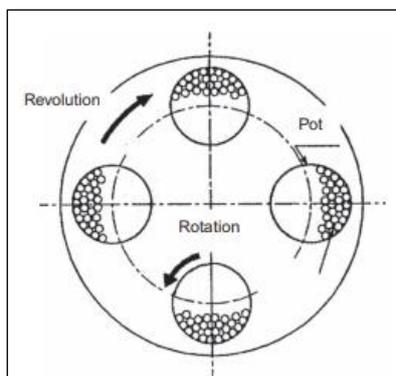


Figura 10: Molino Planetario de bolas.
FUENTE: Neikov (2009)

2.13 Molino de bolas

El Molino de bolas es un equipo de trituración y molienda capaz de proporcionar la energía mecánica que una reacción química, como la del mercurio y el azufre, requiere.

2.13.1 Parámetros de diseño

2.13.1.1 Velocidad de rotación

La selección de la velocidad de rotación para lograr que las bolas del molino alcancen una altura adecuada con las paredes del molino y caigan, considera determinar la velocidad crítica n (RPM) cuando las bolas permanecen pegadas a las paredes del molino por ayuda de la fuerza centrífuga:

$$n = \frac{42,3}{\sqrt{D_m}} \dots \text{Ecuación (02)}$$

Donde D_m es el diámetro del molino en metros. La velocidad óptima de rotación usualmente se encuentra entre 65 – 80 % de la velocidad crítica (Neikov 2009).

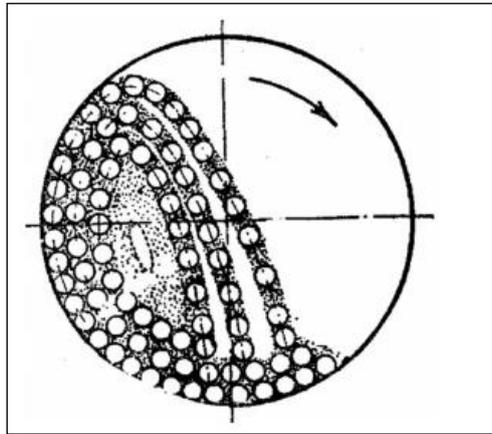


Figura 11:Desplazamiento de bolas en la velocidad de rotación adecuada.
FUENTE: Neikov (2009)

2.13.1.2 Dimensión de las bolas

La dimensión de las bolas en molinos convencionales, donde el objetivo es la trituration del material, depende del tamaño de la partícula de alimentación donde se sugiere un tamaño de $D/18$ a $D/24$ (Neikov 2009). Por otro lado, Fukuda et al. (2014), señala que durante la estabilización del mercurio con azufre, empleando un molino de bolas planetario y probando valores de $D/4$ a $D/13$, se obtuvo lixiviados con concentraciones menores a 0,2 mg/L en menos de 1 hora.

2.13.1.3 Cantidad de bolas en un molino convencional

La cantidad de bolas colocadas en el molino influye sobre la productividad y la eficiencia de la molienda, se recomienda que la capacidad de llenado no debe exceder el 20 a 25 % (Barrios, 2015).

2.13.1.4 Relación entre la longitud y el radio del tambor

La relación entre la longitud y el radio del tambor usualmente aceptado se encuentra entre 1,56 – 1,64 para el caso de los molinos de laboratorio; sin embargo, Según Dueñas (2016) la proporción entre la longitud y el radio para molinos a escala industrial es de 2,35/1.

2.13.1.5 Relación de carga

Un parámetro adicional para el desarrollo de la reacción es la relación de la carga entre las bolas y el contenido de reactantes a utilizar de 5 – 10 bolas/carga que depende de la energía necesaria para la realización de la reacción (López et al., 2011).

2.13.2 Demanda de energía

En un proceso de trituración en un molino de bolas más del 90 % de la energía mecánica entregada al material de carga es transformada en calor incrementando la temperatura del polvo. El incremento de la temperatura se debe a los choques entre bola – bola, bola – material, bola – pared del molino y efectos de fricción. El incremento de la temperatura es proporcional al incremento de energía proporcionada por la velocidad de molienda, velocidad de las bolas, tiempo de molienda, tamaño de las bolas y relación de bolas/material). Adicionalmente es posible que los procesos exotérmicos que ocurren durante el proceso de molienda generen calor adicional (Takacs, 2002; Neikov, 2009).

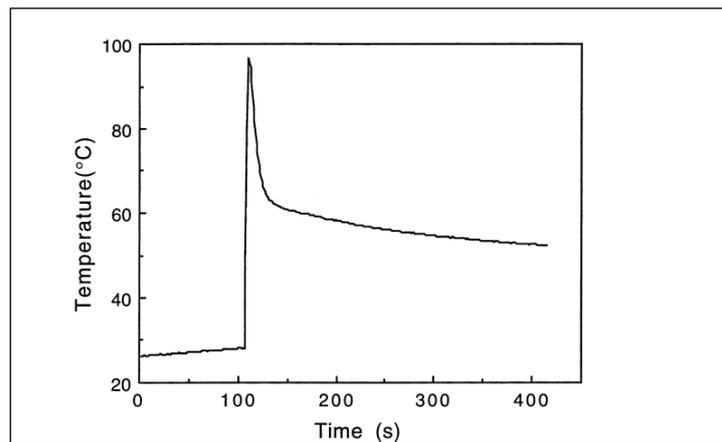


Figura 12: Diagrama de variación de la temperatura durante una reacción mecano-química (reducción del Fe₃O₄ con Zr).
FUENTE: Takacs (2002).

Bhattacharya 1992, plantea una ecuación teórica para la determinación de la variación de la temperatura (ΔT) a partir de la energía mecánica y condiciones del molino, ecuación 03 y 04.

$$\Delta T = \frac{2q_2\Delta r}{\rho c t_0} + \frac{q_2 t_0}{2\kappa} \left[\frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{4n^2\pi^2\alpha\Delta r}{t_0^2}\right) \cos n\pi \right]$$

... Ecuación (03)

$$q_2 = \frac{\delta Q}{\pi r_0^2 \Delta \tau}$$

... Ecuación (04)

Donde: Q = representa la cantidad promedio de incremento de calor debido a procesos de deformación en el intervalo de tiempos $\Delta \tau$; δ es el calor transferido por la compactación, k es la conductividad termal del polvo, t_0 es el ancho del polvo entre las dos bolas en el momento máximo de fuerza de impacto y α es la difusividad termal del material de la bola.

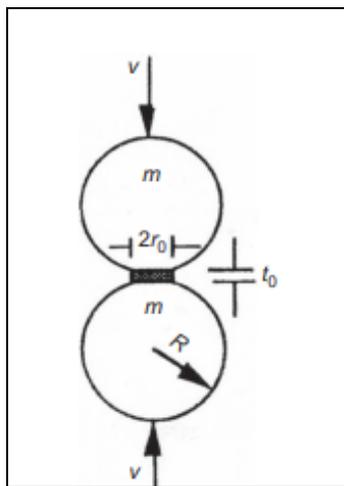


Figura 13: Parámetros geométricos que involucran el impacto entre dos bolas.
FUENTE: Bhattacharya & Arzt (1922).

Considerando que la longitud del polvo compactado es despreciable y que el radio de la partícula es r_0 en el plano z y tiempo cero, la temperatura de contacto T_c al final del impacto está dada por la **ecuación 5** (Bhattacharya y Arzt, 1992).

$$T_c = \frac{Q}{2\pi r_0^2 \rho_s c_{ps} \sqrt{\pi \alpha_s \Delta \tau}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r_0^2}{4\alpha_s \Delta \tau}\right) \right\}$$

... Ecuación (5)

Donde: ρ_s y c_{ps} es la densidad y calor específico del material de la bola.

2.13.3 Demanda de uso

El mercado de mercurio existente está conformado por los subproductos de la minería que explota minerales sulfurosos y extrae oro por el método de Merrill-Crowe, produciendo anualmente en nuestro país un aproximado de 150 toneladas de mercurio (este valor proporcional a la producción de oro según estadísticas del MINEM); otro mercado importante es el mercurio que ingresa a nuestro territorio como contrabando equivalente a 137,5 ton/ año (estimado a partir de los resultados de Chatham House 2017, SUNAT y el Mercado mundial de mercurio); finalmente el Perú dispone de reservas de mercurio con un potencial de 40 ton/año (USGS 2018).

2.13.4 Componentes

Los componentes mínimos que se consideran en el diseño del molino de bolas son el tambor de rotación, chaqueta o cobertor del tambor, bolas de molienda, mecanismo de rotación (motor, motorreductor de 1-10 Hp, piñón, chumacera y rodillos direccionales), sistema de extracción de gases, sistema de alimentación, controles de velocidad, temperatura o presión, entre otros, como se observa en la Figura 14

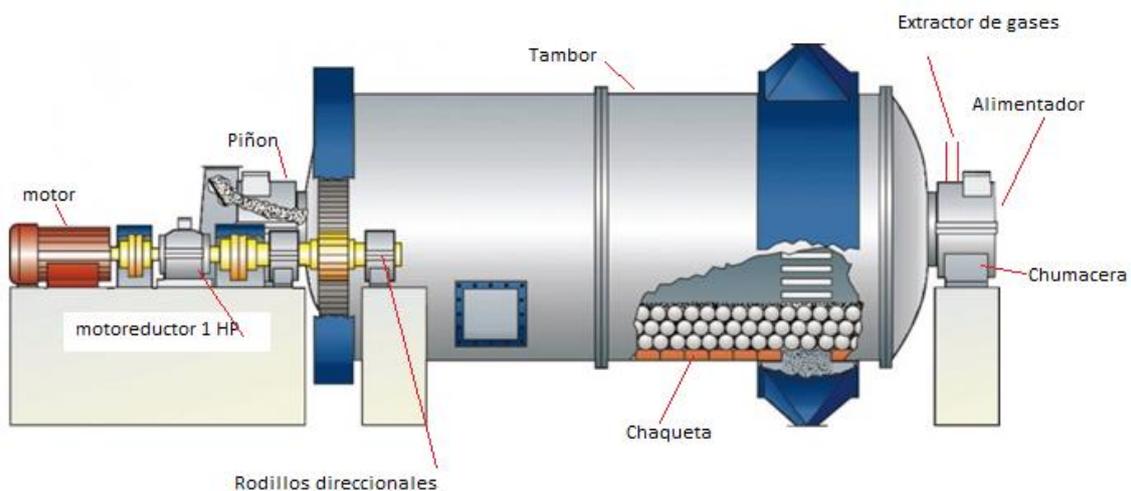


Figura 14: Estructura de un molino de bolas.

FUENTE: Adaptado de Hosokawa Micron Corporation (2020)

2.14 Materiales de construcción

Existen diversos factores que desgastan las paredes del tambor de un molino de bolas y reducen su durabilidad. Entre los principales se encuentran: la abrasión, los impactos y la corrosión. Tener en cuenta estos factores al momento de elegir el tipo de material con el cual

se va a construir el molino, podría aumentar el tiempo de vida útil, incrementar la eficiencia y evitar potenciales accidentes al generarse rajaduras en las paredes (Ratto, 1969)

Según Ratto (1969), al momento de construir un molino, lo ideal sería utilizar un material que sea altamente resistente a la abrasión y al impacto; sin embargo, esto es muy difícil de conseguir debido a que los materiales resistentes a la abrasión son frágiles contra los impactos y los materiales resistentes a impactos ofrecen una baja performance cuando son sometidos a trabajos abrasivos.

Por lo tanto, para la elección de los materiales, según Ratto (1969) se debe tener en cuenta el método de descarga del molino, el tipo de molienda (húmeda o seca), el grado de molienda y la naturaleza del material. Estos factores se detallan en las siguientes subsecciones.

2.14.1 Método de descarga

Según Barrios (2015), en un molino de bolas los métodos de descarga pueden ser:

1. Descarga libre o de desbordamiento (Overflow): Se desarrolla el trabajo en circuito cerrado para producir tamaños de material comprendidos entre 0,3 – 0,8 mm.

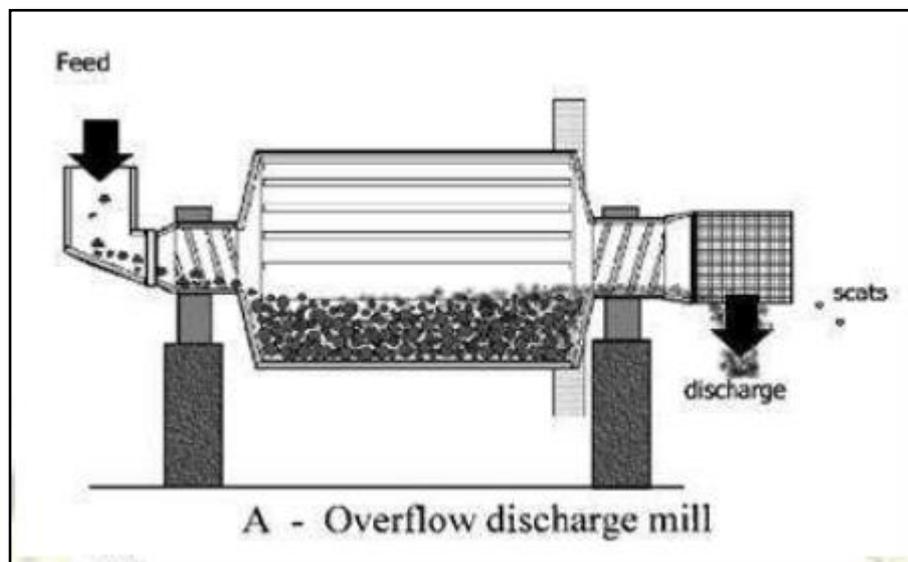


Figura 15: Descarga libre o de desbordamiento (Overflow).
FUENTE: Barrios (2015)

2. Descarga de periferia central: La alimentación generalmente se desarrolla por ambos extremos y se trabaja generalmente en circuito abierto para obtener un tamaño de partícula máximo de 5 – 3 mm.

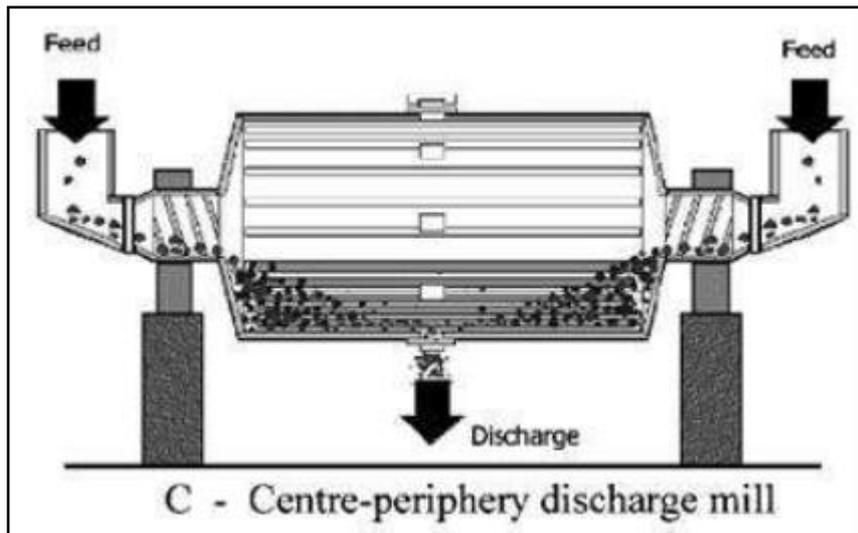


Figura 16: Descarga de periferia central.
FUENTE: Barrios (2015)

3. Descarga de diafragma o rejilla: Es utilizado en un circuito abierto para producir tamaños de partícula de 1 – 3 mm y en circuito cerrado para obtener tamaños máximos de 0,4 – 1 mm.

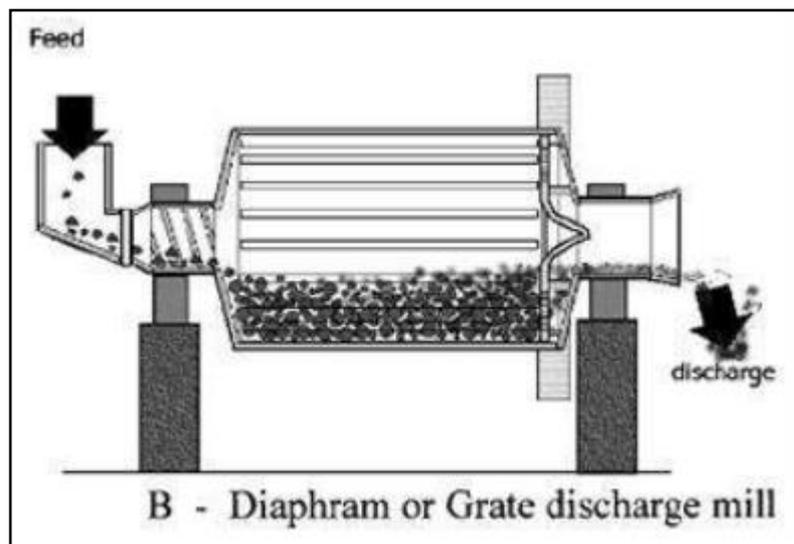


Figura 17: Descarga de diafragma o rejilla.
FUENTE: Barrios (2015)

De estos métodos indicados, la descarga Overflow es la que menos impacto genera en los materiales del molino debido a que existe mayor cantidad de pulpa que amortigua los impactos durante la etapa de operación (Ratto, 2015) .

2.14.2 Tipo de Molienda

Cuando la trituración de los materiales se realiza en presencia de agua o de otros líquidos en cantidad suficiente para producir una pulpa fluida constituida generalmente por 60 y 80% de sólidos, se habla de una molienda húmeda. Por otro lado, cuando el grado de humedad está por debajo del 5%, se trata de una molienda seca (Ratto, 1969).

Algunas consideraciones de estos tipos de molienda son los siguientes:

- La molienda húmeda requiere menos potencia por tonelada de material molido que la molienda seca.
- La molienda húmeda no requiere de costosos y complejos sistemas colectores de polvo.
- La molienda húmeda requiere menos espacio que la molienda seca.

2.14.3 Grado de Molienda

Este puede clasificarse en molienda de alto impacto, de moderado impacto y de abrasión. Según (Ratto, 1969), para determinar el grado de molienda existen diversos factores clave que deben evaluarse y entre las principales se encuentran: Velocidad crítica y tamaño de las bolas.

2.14.3.1 Velocidad crítica

La velocidad crítica permite determinar el grado de impacto existente en un molino bajo las siguientes condiciones:

- Solamente es aplicable a molinos de bolas.
- Presupone que los forros del molino poseen la misma configuración que el cilindro del molino.

Teniendo en cuenta ambas condiciones, se debe calcular el grado de impacto utilizando la velocidad del molino expresada en porcentaje de la velocidad crítica según la siguiente ecuación:

$$\frac{Vm * 100}{Vc} = \%Grado\ de\ impacto$$

Donde:

Vm: Velocidad superficial del molino

Vc: Velocidad crítica del molino

De lo anterior, si el grado de impacto es menor a 30%, entonces la molienda es de abrasión. Si se encuentra entre 30 y 60% se da una acción combinada de abrasión e impacto. Cuando el porcentaje de la velocidad crítica fluctúa entre 70 y 80% se obtiene desgaste por alto impacto con ligera combinación del efecto abrasivo; y finalmente por encima del 80% se considera que las bolas estarán centrifugando (Ratto, 1969).

2.14.3.2 Tamaño de las bolas

El tamaño de las bolas tiene un efecto directo en el grado de impacto tanto en las mismas bolas como en los forros del molino. Cuando más grande es el diámetro mayor será el impacto (Ratto, 1969).

2.14.4 Naturaleza del material

La dureza del mineral y de las rocas que lo acompañan influyen en la duración de los forros de molino. En caso de contar con cuarzo, se podría tener la misma dureza con un acero martensíticos (450-700 Brinell) pero sería más duro que los aceros perlíticos (250-450 Brinell) y que los aceros austeníticos (Ratto, 1969).

Por otro lado, en caso de presencia de feldespatos, estos son más blandos que los aceros martensíticos, pero más duros que los aceros perlíticos y austeníticos. Finalmente, en presencia de calcita, esta es más blanda que todos los aceros aleados por lo que no habría limitaciones en cuanto a elegir un material (Ratto, 1969)

2.14.5 Tipos de material

2.14.5.1 Aceros austeníticos al manganeso o Hadfield

Este tipo de acero se diferencia del resto por sus propiedades mecánicas que le confieren gran resistencia a la tracción y a la compresión, alta ductilidad y excelente resistencia al desgaste. Es el único que combina alta resistencia y ductilidad con gran capacidad de endurecimiento por deformación y resistencia al desgaste metal sobre metal. Las composiciones para los diferentes grados de este material se rigen bajo la norma ASTM A128 (Abril, 2018).

Se utiliza principalmente en componentes de alto desgaste y con impactos repetitivos, así mismo, estas aleaciones son utilizadas en revestimientos a golpe y desgaste como los molinos de bolas (Abril, 2018).

Tabla 4: Composición química de los diferentes grados de aceros Hadfield

Grado	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si (máx.)	P (máx.)
A	1,05 – 1,35	Mínimo	-	-	-	1,0	0,07
B-1	0,9 – 1,05	11,05 - 14	-	-	-	1,0	0,07
B-2	1,05 – 1,2	11,05 - 14	-	-	-	1,0	0,07
B-3	1,12 – 1,28	11,05 - 14	-	-	-	1,0	0,07
B-4	1,2 – 1,35	11,05 - 14	-	-	-	1,0	0,07
C	1,05 – 1,35	11,05 - 14	1,5 – 2,5	-	-	1,0	0,07
D	0,7 – 1,3	11,05 - 14	-	-	3,0 – 4,0	1,0	0,07
E-1	0,7 – 1,3	11,05 - 14	-	0,9	-	1,0	0,07
E-2	1,05 – 1,45	11,05 - 14	-	1,8 – 2,1	-	1,0	0,07
F	1,05 – 1,35	6,0 – 8,0	-	0,9 – 1,2	-	1,0	0,07

FUENTE: Abril, 2018

Tabla 5: Propiedades mecánicas de los aceros al manganeso (Hadfield)

Dureza (HB)	Resistencia a la tracción (MPa)	Energía de Impacto	Elongación (%)	Tenacidad (MPa/m1/2)
170 – 220	280 – 470	136	20 – 40	120

FUENTE: Abril, 2018

2.14.5.2 Acero Martensítico de Bajo Carbono al Cr-Mo

Este tipo de aleaciones presentan bajo carbono y su composición se rige bajo la norma ASTM A148 grado 210-180. Sus principales elementos de aleación son el cromo y molibdeno. Sus propiedades mecánicas se definen durante el tratamiento térmico el cual le provee de una alta resistencia mecánica que lo hace apto para trabajos en donde se generan esfuerzos e impactos y abrasiones de alto nivel. Cabe señalar que, debido a su gran capacidad de resistir los impactos y el desgaste, este material está comenzando a reemplazar al Acero fundido tipo Hadfield (Abril, 2018)

Este tipo de aleaciones se utilizan principalmente en placas de blindajes, martillos de trituración, barras de impacto, y molino de bolas.

A continuación, se muestran la composición química y propiedades físicas de estos aceros.

Tabla 6: Composición Química Estándar de los aceros de Bajo Carbono Cr-Mo

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,25-0,30	1,40-1,60	0,50-0,90	1,80-2,10	0,50 máx.	0,50 máx.

FUENTE:Abril, 2018

Tabla 7: Propiedades Mecánicas de los Aceros de Bajo Carbono Cr-Mo

Dureza (HB)	Resistencia a la tracción (MPa)	Punto de Fluencia (MPa)
450-540	1448	1241

FUENTE: Abril, 2018

2.14.5.3 Aceros Perlíticos de Alto Carbono al Cr-Mo

Es un material constituido por un alto contenido de carbono y aleado con Cromo y Molibdeno a tal punto que se produce una estructura “Perlítica Dura” después del tratamiento térmico de normalizado. Sus composiciones se rigen bajo la norma ASTM A148 150/125.

Este material no posee la dureza ni la resistencia al desgaste abrasivo de las fundiciones blancas al Cr-Mo o Cr-Ni, ni tampoco la resistencia al impacto de los revestimientos de Acero Austenítico al Manganeso; pero su dureza lo ubica a un nivel intermedio de tolerancia al impacto y la abrasión. Su alto límite elástico le permite resistir a la deformación plástica que ocasionan las bolas o barras que pueden producir deformaciones en los forros y ruptura de pernos.

Se utiliza en principalmente en molinos de bolas donde se generan moliendas de moderado-alto impacto, especialmente en forros de molino constituidos por secciones delgadas y gruesas como son los forros de “doble onda” y de los forros de rejilla (Ratto, 1969).

Tabla 8: Composición Química de los Aceros Perlíticos al Alto Carbono Cr-Mo

Grado	C	Si	Cr	Mn	Mo
ASTM A148 150/125	0,7 – 1,1	0,3 – 0,8	1,5 – 3,0	0,6 – 0,9	0,3 – 0,5

FUENTE: Abril, 2018

Tabla 9: Propiedades Mecánicas de los Aceros Perlíticos de Alto Carbono Cr-Mo

Dureza (HB)	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite Elástico (MPa)
300 – 350	1034	861

FUENTE: Abril, 2018

2.14.5.4 Aceros Martensíticos de Alto Carbono Cr-Mo

Son aceros con gran capacidad de resistencia al desgaste por abrasión. Su principal característica es su dureza que oscila entre 500 a 600 HBN

Debido a la variación de carbón y las durezas obtenidas, se utiliza principalmente en partes del molino como las placas levantadoras, parrillas de descarga, placas de blindaje, martillos, etc.

Este acero se considera el material principal utilizado para revestimientos de molinos SAG (semiautógenos).

Tabla 10: Propiedades Mecánicas de los Aceros al Alto Carbono Cr-Mo

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,6 – 1,2	0,6 – 0,9	0,6 – 0,9	2,0 – 8,0	0,5 máx.	1,00 máx.

FUENTE: Abril, 2018

Tabla 11: Propiedades mecánicas del Acero al Alto Carbono Cr-Mo**Dureza (HBN)**

500 – 600

FUENTE: Abril, 2018

2.14.5.5 Hierro Blanco al Niquel Cromo (Ni-Hard)

Conformada por una estructura martensita y austenita que le confiere alta dureza y resistencia a la abrasión, teniendo una naturaleza no-dúctil.

Por su elevada dureza es poco maquinable, e inclusive en las etapas de acabado dentro de su proceso de fabricación, deberá observarse especial cuidado de no sobrecalentar las piezas porque eso puede generar rajaduras. Para mejorar su eficiencia durante la operación es recomendable utilizar enfriadores, aunque eso puede generar costos adicionales.

Este material se utilizaba antiguamente para la construcción de molinos de bolas y barras; sin embargo, ahora se les considera obsoletos debido a la existencia de nuevos materiales de fundiciones al alto Cromo y fundiciones al Cr-Mo.

Los forros que utilizan este material tienen un alto rendimiento en moliendas de bajo a mediano impacto por su alta resistencia al desgaste de origen abrasivo y a la corrosión por lo que se le emplea con éxito en molienda húmeda.

A continuación, la Tabla 12 y la Tabla 13 muestran las principales composiciones químicas de este material y sus propiedades mecánicas.

Tabla 12: Composición Química de Ni-Hard y Mo solo en casos especiales

Grado	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo
Ni-Hard 1	3,0 – 3,6	0,3 - 0,5	0,3 – 0,7	Máx. 0,15	Máx. 0,30	3,3 – 4,8	1,5 – 2,6	0 – 0,4
Ni-Hard 2	Máx. 2,9	0,3 - 0,5	0,3 – 0,7	Máx. 0,15	Máx. 0,30	3,3 – 5,0	1,4 – 2,4	0 – 0,4
Ni-Hard 3	2,6 – 3,2	1,8 – 2,0	0,4 – 0,6	Máx. 0,1	Máx. 0,06	4,5 – 6,5	8,0 – 9,0	0 – 0,4

FUENTE: Abril, 2018

Tabla 13: Propiedades mecánicas de los Aceros Ni-Hard en sus tres grados

Grado	Dureza	Resistencia a la Tracción (Mpa)	Energía de Impacto
Ni-Hard 1	56-63	280 – 350	28 - 41
Ni-Hard 2	54-60	320 – 390	35 – 48
Ni-Hard 3	56-63	500 - 600	-

FUENTE: Abril, 2018

2.14.5.6 Hierro Blanco al alto Cromo

Son materiales con gran resistencia al desgaste debido a su alto contenido de carburos. La composición de este material se rige bajo la normativa ASTM A532 IIIA.

Debido a su alta dureza presentan una buena resistencia al desgaste abrasivo pero debido a esta alta dureza son frágiles y poco maquinables.

Se utiliza principalmente para fundiciones de sección más gruesa expuestas a un entorno de alto impacto, como en molienda y chancado. Generalmente se usa en molino de barras y también en molino de bolas. A continuación, las siguientes tablas muestran la composición química de este material y sus propiedades mecánicas.

Tabla 14: Composición Química de Hierro Blanco al Alto Cromo

Grado	C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo
ASTM A532 IIIA	2,3 – 3,0	1,0 máx.	23 – 30	1,5 máx.	0,5 – 1,5	1,5 máx.

FUENTE: Abril, 2018

Tabla 15: Propiedades Mecánicas de las Fundiciones al Alto Cromo

Grado	Dureza (HRC)	Resistencia a la compresión (MPa)	Energía de Impacto (J)
ASTM A532 IIIA	48	1380	170

FUENTE: Abril, 2018

2.14.5.7 Hierro Blanco Martensítico al Cr-Mo

Está constituido por carburos duros en una matriz de martensita y austenita retenida. Este tipo de material se recomiendan para aplicaciones en donde los altos esfuerzos de tensión y de impacto son innecesarios, es decir, en molienda de bajo a mediano impacto. Poseen una excelente resistencia a la corrosión y al desgaste abrasivo del tipo erosivo (esmerilado, arañado o raspado).

Se utilizan principalmente en barras de desgaste de martillos para trituradores de carbón, impulsores, rodillos mezcladores, paletas para mezclar concreto, etc. A continuación, se muestran sus principales composiciones según la normativa y sus propiedades mecánicas.

Tabla 16: Composición Química de los diferentes grados de Hierro Blanco al Cr-Mo

Grado	C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo
ASTM A532 IIA	2,4 – 2,8	1,0 máx.	12	0,5 máx.	0,5 – 1,5	0,5 – 1,0
ASTM A532 IIB	2,4 – 2,8	1,0 máx.	15	0,5 máx.	0,5 – 1,5	1,0 – 3,0
ASTM A532 IIC	2,8 – 3,6	1,0 máx.	15	0,5 máx.	0,5 – 1,5	2,3 – 3,5
ASTM A532 IID	2,0 – 2,6	1,0 máx.	20	1,5 máx.	0,5 – 1,5	1,5 máx.
ASTM A532 IIE	2,6 – 3,2	1,0 máx.	20	1,5 máx.	0,5 – 1,5	1,5 máx.

FUENTE: Abril, 2018

Tabla 17: Dureza de los diferentes grados de Hierro Blanco al Cr-Mo

Grado	Fundido en Arena (HRC)	Templado (HRC)	Recocido (HRC)
ASTM A532 IIA	54	57	44
ASTM A532 IIB	48	57	44
ASTM A532 IIC	54	57	44
ASTM A532 IID	48	57	44
ASTM A532 IIE	54	57	44

FUENTE: Abril, 2018

A modo de resumen, el siguiente cuadro muestra los tipos de materiales identificados.

Tabla 18: Principales materiales utilizados para construir Molinos de Bolas y sus características

Tipo de Material	Dureza	Aplicación	Característica principal
Aceros Austeníticos al Manganeso (Hadfield)	170 – 220 (HB)	Alto impacto	Alta resistencia al desgaste e impactos repetitivos.
Acero Martensítico de Bajo Carbono al Cr-Mo	450 – 540 (HB)	Alto Impacto	Muy alta resistencia a impactos y desgaste.
Acero Perlítico de Alto Carbono al Cr-Mo	300 – 350 (HB)	Intermedio impacto	Intermedia resistencia a impactos y desgaste
Acero Martensítico de Alto Carbono al Cr-Mo	500 – 600 (HB)	Bajo a Mediano Impacto	Alta resistencia al desgaste y alta dureza
Hierro Blanco al Niquel Cromo	544 – 705 (HB)	Bajo a Mediano Impacto	Alta resistencia al desgaste y alta dureza
Hierro Blanco al alto Cromo	459 (HB)	Alto impacto	Alta resistencia al desgaste
Hierro Blanco Martensítico al Cr-Mo	411 – 593 (HB)	Bajo a Mediano Impacto	Alta resistencia al desgaste

FUENTE: Abril, 2018; Ratto, 1969

2.14.5.8 Acero ASTM A36

Son también conocidos como laminado en caliente (LAC) de acero en calidad A36. Consta de una placa de acero estructural utilizado para la construcción en general y aplicaciones industriales. Según Dueñas & Gonzales (2016), este tipo de acero es el más utilizado para la construcción de estructuras de soporte debido a sus propiedades mecánicas que le confieren gran resistencia a la tracción.

Tabla 19: Composición química del Acero ASTM A36

Grado	C	Mn	P	S	Si
B	0,25	0,8 – 1,2 máx.	0,040 máx.	0,050 máx.	0,40 máx.

FUENTE: Dueñas & Gonzales (2016)

Tabla 20: Propiedades mecánicas del Acero ASTM A36

Grado	Límite de Fluencia (kg/mm²)	Resistencia a la tracción (kg/mm²)	Alargamiento (%) en 50 mm
ASTM A36	24 min	41 min	18 min

FUENTE: Dueñas & Gonzales (2016)

2.14.5.9 Acero Galvanizado # 18

Según Dueñas & Gonzales (2016), el acero galvanizado es comúnmente utilizado para el desarrollo de carcasas de molinos debido a que son resistentes a la corrosión, presentan gran rigidez estructural, son de fácil y bajo costo de manufactura, y limitan el acceso a los elementos internos del equipo para prevenir accidentes.

Tabla 21: Composición química del Acero galvanizado

Grado	C	Mn	P	S
B	0,15	0,6	0,050	0,050

FUENTE: Dueñas & Gonzales (2016)

Tabla 22: Propiedades mecánicas del Acero galvanizado

Grado	Dureza (HRB)	Esfuerzo de tensión (N/mm²)
ASTM A36	85	270 min

FUENTE: Dueñas & Gonzales (2016)

2.15 Método de mínimos cuadrados

Este método se utiliza para obtener la línea recta que mejor se ajusta o aproxima a una serie de datos en el plano, de manera que se pueda predecir el comportamiento del fenómeno en estudio, permitiendo lograr obtener conclusiones con buena aproximación al comportamiento real (Esparza, s.f.)

En pocas palabras, es posible utilizar este método para realizar proyecciones basados en el comportamiento de los datos, los cuales se rigen mediante la ecuación de regresión lineal mostrada a continuación.

$$Y = a_0 + a_1X$$

Donde:

a_0 : es el valor de la recta que intercepta al eje Y

a_1 : es el valor de la pendiente de la recta

Y: es la variable dependiente

X: es la variable independiente

Así mismo, los valores a_0 y a_1 están determinados por las siguientes ecuaciones:

$$a_0 = \frac{\Sigma y \cdot \Sigma x^2 - \Sigma x \cdot \Sigma xy}{n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}$$

$$a_1 = \frac{n \cdot \Sigma xy - \Sigma x \cdot \Sigma y}{n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}$$

2.16 Equipos de Protección Personal para trabajos con mercurio

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente - PNUMA (2019), los equipos de protección personal para trabajos con mercurio deben incluir como mínimo lo siguiente:

1. Gafas protectoras: Sirven para proteger los ojos y el área ocular circundante de productos químicos y partículas no deseadas. Esto es importante para evitar exposición al vapor de mercurio.
2. Mascarilla respiratoria: Sirve para filtrar las partículas no deseadas, limitando la absorción de vapores y humos de mercurio. Hay diferentes tipos de mascarilla en el mercado, ya sean de media cara o cara completa, ambas pueden ser utilizadas. Es importante identificar la máscara como una pieza diferente de los filtros. Los filtros deben ser adecuados para los vapores y humos de mercurio.
3. Guantes de seguridad: Sirven para proteger las manos del contacto con mercurio. El material sugerido es NBR (goma de nitrilo), debido a que ofrece una buena resistencia al mercurio y es fácil de conseguir en el mercado.
4. Botas de Seguridad: Sirven para proteger los pies de derrames químicos. Se recomiendan botas de goma de nitrilo debido a su buena resistencia al mercurio.
5. Traje de protección ante químicos: Sirven para evitar la contaminación de la ropa de las personas encargadas de manipular el mercurio. Se recomienda que sea de tipo overol, transpirable, antiarrugas, anti-encogimiento, impermeable y desechable.

III. METODOLOGÍA

3.1. Cantidad Potencial de mercurio a tratar

Utilizando información secundaria se estimó la cantidad de mercurio disponible en el país para el periodo comprendido entre los años 2011 y 2030. Para ello, se identificaron datos históricos de las principales fuentes de generación de mercurio, entre los que se encuentra el potencial minero de producción de mercurio del país, el cual fue obtenido de las estadísticas anuales de producción de minerales del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2011-2020). El mercurio residual como subproducto de la gran minería que fue obtenido de las estadísticas de producción de oro del Ministerio de Energía y Minas (MINEM) de los últimos años y el factor de generación de mercurio por tonelada de oro sugerido por Arana (2009). La cantidad de mercurio retenido por contrabando que fue estimada a partir del registro de las exportaciones de mercurio al Perú y Bolivia según la base de datos COMTRADE de las Naciones Unidas (2019). Todos los datos recopilados para cada fuente de generación fueron proyectados utilizando ecuaciones de regresión hasta el año 2030.

3.2. Selección del equipo de Molienda

Para la estabilización del mercurio, entre los equipos de trituración y molienda disponibles en el mercado nacional, se eligió aquel cuya capacidad de fricción y calentamiento permitiera promover una reacción química. Para ello se tomó como referencia la información técnica de equipos de molienda y trituración brindada por Neikov (2009) y se realizó una comparación entre los costos de construcción. Esto, con la finalidad de identificar las ventajas y desventajas de cada uno de estos equipos y posteriormente elegir el más adecuado para la reacción de estabilización que el proyecto requiere.

3.3. Dimensionamiento del Molino de Bolas

Los criterios utilizados para determinar el volumen y las dimensiones del molino de bolas fueron: la cantidad máxima de mercurio a tratar; la carga (relación de bolas y material a tratar) y la relación estequiométrica entre mercurio y azufre tomando como referencia lo propuesto por López et al. (2011); la información del tipo de material, tamaño y peso de las

bolas con lo que se estimó la cantidad de bolas a utilizar y el volumen que ocupan las bolas; el volumen libre necesario para la reacción según lo sugerido por Barrios (2015); la relación adecuada entre el diámetro y longitud del tambor (Dueñas y Gonzales 2016). Cabe señalar que, con fines conservadores, se ha optado por que el molino cubra solamente el 21% de la oferta total debido a que no se cuenta con la suficiente flexibilidad legal para disponer del mercurio total y para simplificar los cálculos estequiométricos. A continuación, en el siguiente diagrama se resumen las etapas realizadas durante el dimensionamiento.

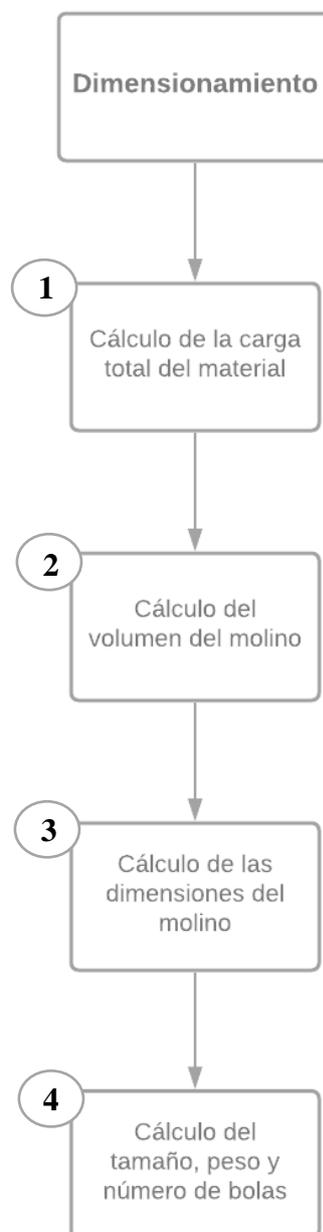


Figura 18: Diagrama de Flujo de la etapa de Dimensionamiento.

3.4 Parámetros de operación

Se determinaron los parámetros óptimos de operación que influyen directamente en la estabilización del mercurio tales como la velocidad de rotación, temperatura, presión y tiempo de operación. La velocidad de rotación fue estimada a partir de la ecuación de velocidad crítica de Neikov (2009), la cual se muestra en la **Sección 2.13.1.1. Velocidad de Rotación**, y ajustada utilizando los criterios de carga de material, tamaño y tipo de material de bolas según lo propuesto por Guerrero (2016). La temperatura de contacto fue estimada a partir de la **Ecuación 5** que se muestra en la **Sección 2.13.2** y que fue propuesta por Bhattacharya y Arzt (1992). Esta fue comparada con la temperatura máxima que se puede alcanzar en la reacción antes de que el metacinnabrio se descomponga según Rinse (1928). La presión teórica fue seleccionada a partir de lo señalado por Dikson y Tunel (1959) quienes realizaron un estudio para evaluar el valor máximo que podría alcanzar la presión dentro de la reacción antes de que el metacinnabrio comience a descomponerse. Finalmente, el tiempo de contacto para el tratamiento fue seleccionado a partir de la información presentada por Fukuda et al. (2014) y Lecke y Nulf (1994) quienes realizaron pruebas en condiciones estándar de estabilización de mercurio con azufre y obtuvieron tiempos de estabilización óptimos.

3.5. Construcción del molino

Se realizó la construcción del molino bajo los parámetros de diseño y operación propuestos en las **Secciones 3.2, 3.3 y 3.4**, verificando la viabilidad de uso para la estabilización del mercurio. Para ello, se elaboraron los planos de acuerdo con las dimensiones estimadas en la **Sección 3.3**. Luego, se seleccionaron los materiales de construcción para el tambor del molino de acuerdo con lo sugerido por Ratto (1963) y Abril (2018), quienes sugirieron materiales para la construcción de un molino de acuerdo con el tipo de uso de este en la **Sección 2.14. Materiales de construcción**. Para el caso de la cobertura y los soportes del molino se consideró lo sugerido por González (2016) quien diseñó un molino de bolas y propuso los materiales más adecuados para estos componentes específicos. Después, se seleccionó el motor en función a la potencia requerida utilizando la ecuación empírica de Bond (1961) que se muestra continuación:

$$Kwb = 2.8 * D^{0.4} * (3.2 - 3Vp) * Cs * (1 - \frac{0.1}{2^{9-10Cs}})$$

Finalmente se construyó el molino y se implementó su sistema de extracción de gases. A continuación, se muestra la secuencia de pasos seguida para la construcción del Molino de Bolas y su Sistema de Extracción de Gases (SEG).

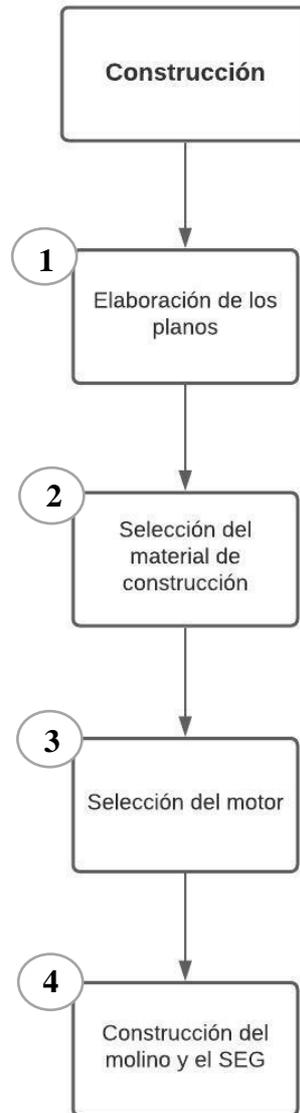


Figura 19: Diagrama de Flujo de la etapa de Construcción

3.6. Ensayos de Estabilización

Para validar los parámetros de operación y estimar la eficiencia del equipo, se realizaron tres ensayos con el molino variando la carga bola/material, en proporciones de 5/1, 7/1 y 10/1 según lo sugerido por López et al. (2011); y considerando además una relación

estequiométrica de mercurio y azufre de 1:1. Se trabajó con un tiempo de tratamiento de 60 min ya que es el tiempo óptimo recomendado por Fukuda et al. (2014) y Lecke y Nulf (1994) quienes realizaron pruebas en condiciones estándar de estabilización de mercurio con azufre y obtuvieron tiempos de estabilización óptimos de 1 hora en promedio. Cabe señalar que durante todo el proceso se controló la temperatura externa del molino. Los ensayos preliminares se desarrollaron siguiendo las etapas señaladas en el siguiente diagrama.

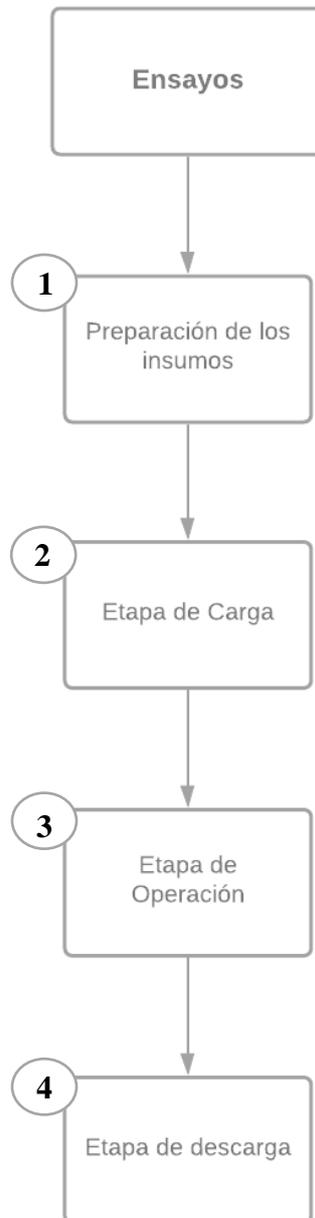


Figura 20: Diagrama de Flujo del proceso de Ensayos preliminares de estabilización

3.7. Ensayos de TCLP

Se evaluó la eficiencia del proceso mediante el test de “Toxicity Characteristic Leaching Procedure” (TCLP) método EPA 1311 y la determinación de los metales totales en el extracto de TCLP por el método EPA 6020B, Rev 02: 2014.- Espectrometría de Masas de Inductively Coupled Plasma (ICP), para lo cual se extrajo 03 muestras de 0.5 kg del producto estabilizado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Cantidad Potencial de mercurio a tratar

4.1.1 Potencial minero de producción de mercurio en el Perú

La estimación de este potencial tuvo como actividades principales la recopilación de información histórica del potencial de producción de mercurio en nuestro país y la identificación de su tendencia mediante su ecuación de regresión. Para el primer punto, se extrajo información del potencial de las estadísticas anuales de producción de minerales del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2011-2020)⁵. A esta información se le aplicó el método de mínimos cuadrados (Ver Sección 2.15) propuesto por Esparza (S.f.) para identificar su ecuación de regresión y proyectar sus valores para los próximos 10 años. Los cálculos de esta proyección se detallan en el ANEXO 1 y sus resultados se observan en la Tabla 23 y la Figura 21.

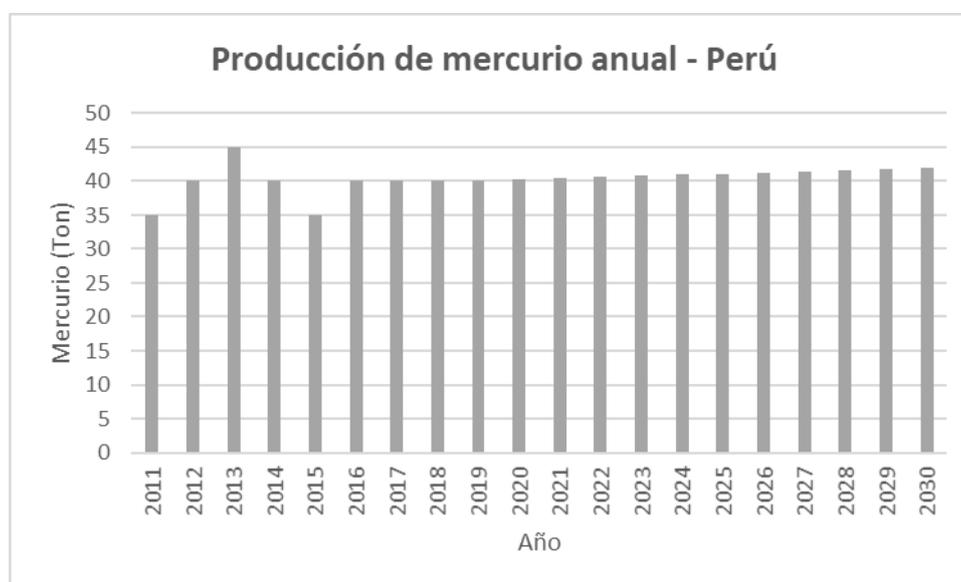


Figura 21: Resumen del potencial de producción de Mercurio en el Perú (2011-2030).
FUENTE: Elaboración propia; USGS (2011-2020)

⁵ Los documentos revisados se titulan “Mineral Commodity Summaries” y se actualizan anualmente. Para el presente estudio fueron considerados los documentos de los años 2011 al 2020.

Tabla 23: Proyección del potencial de producción de Mercurio en el país para el 2019-2030

Año	Toneladas de Mercurio	Año	Toneladas de Mercurio
2011	35	2021	40
2012	40	2022	41
2013	45	2023	41
2014	40	2024	41
2015	35	2025	41
2016	40	2026	41
2017	40	2027	41
2018	40	2028	42
2019	40	2029	42
2020	40	2030	42

Se observa que desde el 2011 al 2020 el potencial de mercurio se ha mantenido en 40 ton/año aproximadamente debido al cese de la explotación de mercurio en la mina Santa Barbara de Huancavelica desde la década del 90 (Del Solar, 2017). Adicional a ello, la ratificación del Convenio de Minamata en el Perú desde el 2015 impide el reinicio de las actividades mineras de mercurio (MINAM, 2016).

Esta situación es similar a la tendencia encontrada para Colombia cuya cantidad de mercurio importado a partir del 2017 disminuyó drásticamente de acuerdo al World Integrated Trade Solution (2019) debido al “Plan Único Nacional de Mercurio” que fue implementado en el

2015 con el objetivo de constituir aplicaciones tempranas del convenio de MINAMATA según la Cancillería de Colombia (S.f.) y a la Ley 1658 del 2013 que estableció un plazo de 5 años para la erradicación del uso de mercurio en la minería (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, S.f.).

Por lo tanto, de acuerdo con la promulgación del D.S. 061-2015-RE “Ratificación del Convenio de Minamata sobre el mercurio” y la proyección realizada, el potencial minero de producción de mercurio en el Perú para el periodo 2019 al 2030 no tendrá demanda adicional, como se observa en la Tabla 23, y se mantendrá con un valor de 40 ton/año en promedio para los próximos 10 años, como se observa en la Figura 21.

4.1.2 Mercurio residual como subproducto de la gran minería en el Perú

La proyección de mercurio residual producto de la gran minería fue calculada a partir de los datos de crecimiento de la producción de oro, ya que se estima que la gran minería produce una cantidad de mercurio equivalente a la cantidad de oro fino producido. La proporción de producción oro y mercurio para Arana (2009) fue de 1:1 y según lo señalado por Salas (2017), durante el proceso de recuperación del oro, específicamente durante el proceso Merrill Crowe, tanto el oro, como la plata y el mercurio precipitan proporcionalmente debido a la diferencia de su electronegatividad con respecto al Zinc obteniendo un rango de relación oro y mercurio entre 0.5:1 – 2.93;1, teniendo como promedio el valor de 1.91;1. Con fines conservadores para el cálculo del mercurio como subproducto se utilizó la relación oro y mercurio de 1:1.

Los valores de producción de oro fueron obtenidos de estadísticas del Ministerio de Energía y Minas (MINEM) de los últimos años. Luego, a estos valores se les aplicó el método de mínimos cuadrados para identificar su correlación y proyectarlos hacia los próximos 10 años. Finalmente, se estimó la cantidad de mercurio en función a la cantidad de oro. Los cálculos de estas proyecciones se detallan en el ANEXO 2 y sus resultados se observan en la Tabla 24 y Figura 22 a continuación.

Tabla 24: Proyección de la cantidad de mercurio residual generado por la gran minería en el Perú (2011 – 2030)

Año	Toneladas de mercurio	Año	Toneladas de mercurio
2011	166,19	2021	128.74
2012	161,54	2022	125.38
2013	151.49	2023	122.03
2014	140.10	2024	118.67
2015	146.82	2025	115.32
2016	153.01	2026	111.97
2017	151.96	2027	108.61
2018	140.21	2028	105.26
2019	128.41	2029	101.91
2020	132.09	2030	98.55

FUENTE: Elaboración propia; MINAM, 2016

Debido a que las fuentes de explotación de oro cada vez son más escasas la producción de mercurio como subproducto de la producción de oro disminuirá en un 40% para el 2030, como se observa en la Tabla 24 y Figura 22 similar a lo propuesto por UPME (2018). Sin embargo, se debe indicar que existen otros metales cuya explotación pueden generar como subproducto mercurio aunque para este estudio no han sido considerados.

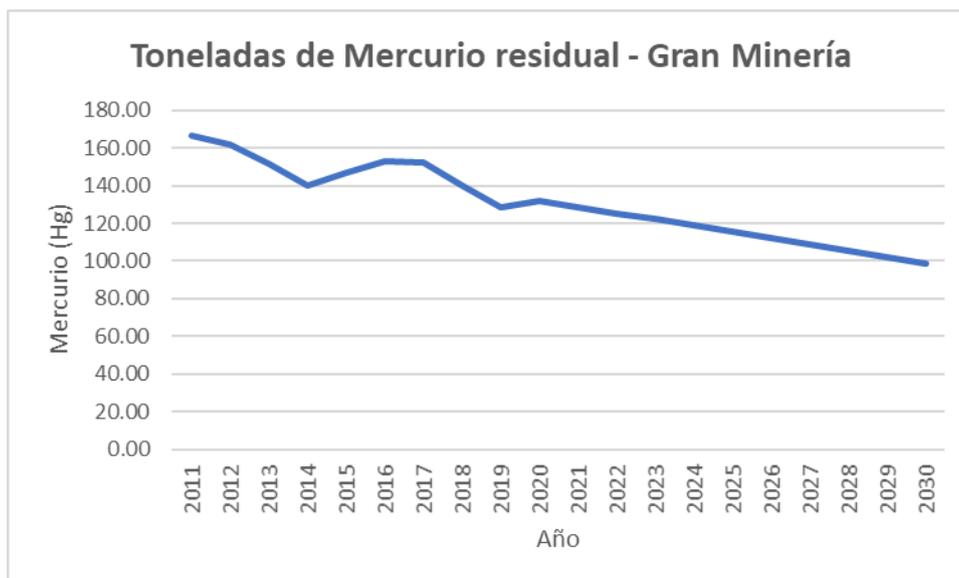


Figura 22: Proyección de la cantidad de mercurio residual producto de la gran minería en el Perú (2011-2030).

FUENTE: Elaboración Propia; Ministerio de Energía y Minas (MINEM)

4.1.3 Mercurio retenido por contrabando en el Perú

Para determinar la cantidad de mercurio que ingresa al país por contrabando, se hicieron varias asunciones debido a la limitada información disponible. Se revisó la información histórica de importación y exportación de este elemento, con la finalidad de identificar posibles rutas y cantidades de ingreso de mercurio ilegal al país.

Se identificó que, durante los años 2012 y 2014, el Perú fue el principal importador de mercurio en Sudamérica con un promedio de 114 toneladas de mercurio al año. Del mismo modo, México fue el principal exportador de mercurio al país, con aproximadamente el 85% del mercurio total importado (**Ver Tabla 25**). (Base de datos COMTRADE de las Naciones Unidas, 2019).

Tabla 25: Principales rutas y cantidad de exportación de mercurio

Año	País de Origen	País destino	Toneladas
2012	México	Perú	107,268
	México	Bolivia	9,764
	Singapur	Perú	7,762
2013	México	Perú	146,851
	México	Bolivia	4,005
	Singapur	Perú	5,175
2014	México	Perú	94,288
	México	Bolivia	23,978
	Singapur	Perú	5,175
2015	México	Bolivia	138,588
	México	Perú	11,73
2016	México	Bolivia	193,166
	India	Bolivia	0,035
	Singapur	México	5,175
2017	México	Bolivia	142,439
	Singapur	México	5,175
	Bolivia	Perú	0,198
2018	México	Bolivia	163,277
	India	Bolivia	8,02

FUENTE: COMTRADE – Naciones Unidas, 2019

Con esta información, se observó que hasta el año 2013 la cantidad de mercurio exportado por México, India y Singapur hacia Perú superaba en conjunto las 150 toneladas. Sin embargo, con la suscripción del Perú al convenio de Minamata el 10 de octubre de 2013, las

concentraciones de mercurio, fueron disminuyendo exponencialmente en el país tal y como se puede ver en la Figura 23.



Figura 23: Disminución de la importación de Mercurio por el Perú desde México (2012-2018).
FUENTE: COMTRADE – Naciones Unidas, 2019

A medida que la cantidad de mercurio importado en el país iba disminuyendo, nuestro país vecino, Bolivia, quien hasta ese mismo año no superaba las 8 toneladas de mercurio importado, fue incrementando su importación de mercurio en la misma cantidad y medida que en el Perú iba disminuyendo como se observa en la Figura 24 (World Integrated Trade Solution, 2012-2018). Adicionalmente se observó una situación que reforzó más esta asunción, pues legalmente todo el mercurio que comenzó a llegar a Bolivia no salió del país, dando indicios de que el incremento de la cantidad de mercurio importado sirvió para suplir la demanda de mercurio de la minería artesanal y a pequeña escala en el Perú. Además, se sabe según Gavin et al. (2020) que la finalidad del mercurio producido en México fue la minería artesanal del oro.

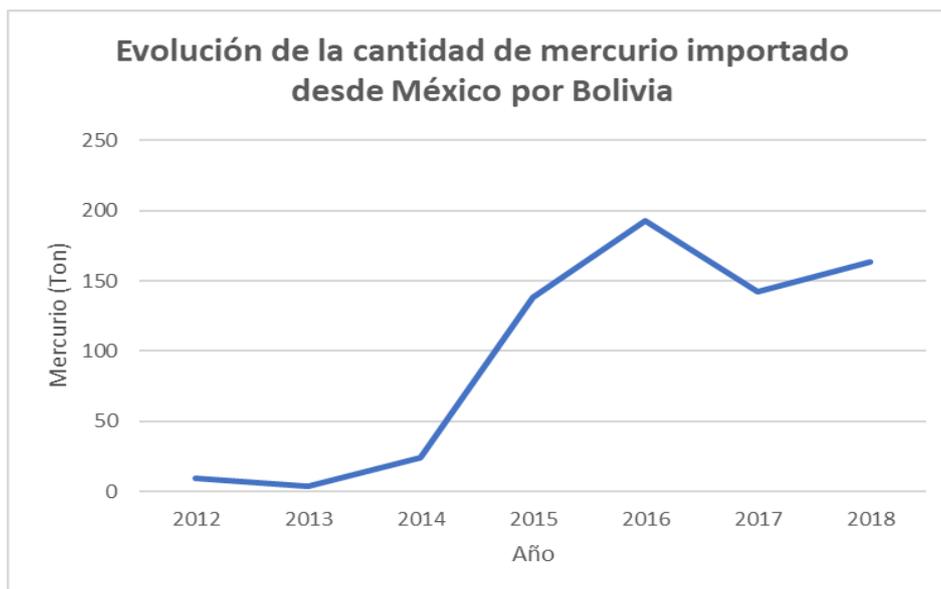


Figura 24: Incremento de la importación de Mercurio por Bolivia desde México (2012-2018).
FUENTE: COMTRADE – Naciones Unidas, 2019

Para una mayor claridad la Figura 25 muestra una comparación en la evolución de la cantidad de importaciones realizadas por Perú y Bolivia desde México durante los años 2012 y 2018.

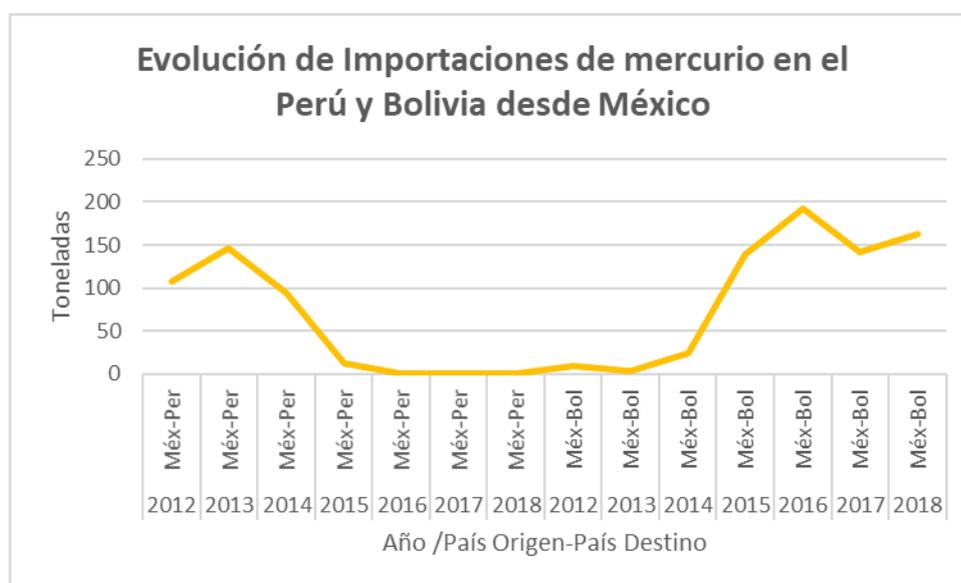


Figura 25: Evolución de la cantidad de Importaciones desde México hacia Perú y Bolivia.
FUENTE: COMTRADE – Naciones Unidas, 2019

Con esta información, se determinó que la cantidad de mercurio que ingresa por contrabando al Perú es aproximadamente la misma cantidad que actualmente ingresa a Bolivia, la cual es de 130 toneladas. Este dato se obtuvo realizando la diferencia en las cantidades de importación de mercurio entre los años 2014 y 2015, los años donde la cantidad de mercurio importado en este país se disparó de 23 a 138 toneladas (Ver Tabla 25).

Para reforzar la cantidad estimada, se decidió utilizar información de las Naciones Unidas, específicamente del Global Mercury Supply Trade and Demand (2017), y la información de importaciones de mercurio al Perú, de la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT).

Con la información de ambas entidades se observó que para el año 2017 el Perú utilizó aproximadamente 145 toneladas de mercurio para la minería artesanal y a pequeña escala (Global Mercury Supply Trade and Demand, 2017). Ese mismo año según la SUNAT, el Perú importó 5 toneladas de mercurio al país (SUNAT, 2017).

Es evidente que las 5 toneladas que ingresaron al país no fueron suficientes para suplir las 145 toneladas que demanda la minería artesanal y a pequeña escala⁶; en consecuencia, se puede asumir que la diferencia que existe entre el mercurio utilizado en la minería artesanal y el mercurio importado es la cantidad no contabilizada legalmente, por ende, es la cantidad de mercurio que ingresa por contrabando.

Este déficit de 140 toneladas es similar a la cantidad que antes ingresaba al país directamente por importación y que ahora es derivada desde México hacia Bolivia (World Integrated Trade Solution, 2010-2018)

De todo lo anterior se estimó que para el año 2017, la cantidad promedio de mercurio que ingresó por contrabando al país fue de 137,5 toneladas.

Asumiendo que esta cantidad representa el mercurio que ingresó al país por contrabando, se realizó la proyección de la oferta de este elemento para los años 2020-2030, con ayuda del método de mínimos cuadrados explicado por Esparza (s.f.) y el crecimiento de la producción del oro, identificado en la base de datos del Ministerio de Energía y Minas (2020).

Para ello, primero se determinó que existe una proporcionalidad directa de crecimiento entre la producción del oro y la cantidad de mercurio generado, es decir, a medida que se incrementa la cantidad de oro producido, también se incrementa la cantidad mercurio utilizado (PNUMA, 2008).

Luego, con la correlación del crecimiento en la producción de oro identificada, se procedió a proyectar los valores de la cantidad de mercurio ofertado en el país por contrabando; esto

⁶ Esta cantidad podría ser abastecida por el mercurio residual producto de la gran minería, sin embargo, esto no es posible debido a que el Mercurio producido por estas empresas son drásticamente fiscalizadas por las autoridades y son generalmente exportadas a los Estados Unidos para su procesamiento; por lo cual se descarta que el Mercurio proveniente de la gran minería sea utilizada por la minería artesanal e ilegal.

utilizando el método de mínimos cuadrados. Los detalles de los cálculos realizados se encuentran en el ANEXO 3 y los resultados se observan en la Tabla 26 y Figura 26 a continuación.

Tabla 26: Proyección de la cantidad de mercurio que ingresa al país por contrabando

Año	Toneladas de mercurio	Año	Toneladas de mercurio
2011	153,10	2021	118,60
2012	148,83	2022	115,51
2013	139,56	2023	112,42
2014	129,07	2024	109,33
2015	135,26	2025	106,24
2016	140,96	2026	103,15
2017	140,00	2027	100,06
2018	129,17	2028	96,97
2019	118,30	2029	93,88
2020	121,69	2030	90,79

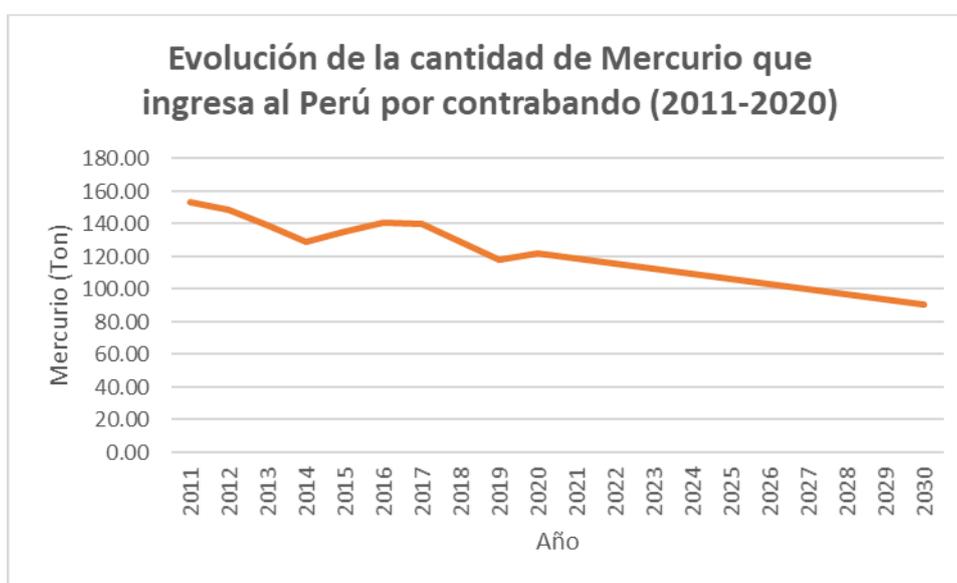


Figura 26: Evolución de la cantidad de mercurio que ingresa al país por contrabando.
FUENTE: COMTRADE – Naciones Unidas, 2019

Tabla 27: Estimación y proyección de la oferta de mercurio en el Perú entre los años 2011-2030

Año	Potencial de producción del país (ton)	Mercurio residual de la Gran Minería de Oro (ton)	Mercurio retenido por contrabando (ton)
2011	35	166,19	153,10
2012	40	161,54	148,83
2013	45	151,49	139,56
2014	40	140,10	129,07
2015	35	146,82	135,26
2016	40	153,01	140,96
2017	40	151,96	140,00
2018	40	140,21	129,17
2019	40	128,41	118,30
2020	40	132,09	121,69
2021	40	128,74	118,60
2022	41	125,38	115,51
2023	41	122,03	112,42
2024	41	118,67	109,33
2025	41	115,32	106,24
2026	41	111,97	103,15
2027	41	104	100,06
2028	42	100	96,97
2029	42	97	93,88
2030	42	94	90,79

La Tabla 27, resume las cantidades de mercurio ofertadas en el país por las tres principales fuentes de generación. Como se observa se producen 282 ton/año de mercurio, según fuentes oficiales para el 2019 el mercurio enviado al extranjero para estabilización y disposición final u otros usos fue de 91 ton/año según el World Integrated Trade Solution (2021) lo cual representa solo el 32 % de la cantidad potencial a producir, quedando un gran mercado para estabilización y disposición en nuestro país.

Con este análisis se determinó que el molino de bolas debe tener un diseño con la capacidad de estabilizar una cantidad máxima de mercurio metálico de 282 toneladas anuales aproximadamente.

4.2 Selección del equipo de Molienda

Tal como lo describe Neikov (2009), existen dos tipos de maquinarias que tienen la capacidad de realizar la molienda y mezcla de materiales (principalmente minerales) a diferentes escalas, estos son: las trituradoras y los molinos. Dentro de estas se encuentran las trituradoras de quijadas y martillos; y los molinos planetarios y de bolas.

En general las trituradoras, a comparación de los molinos, son menos costosos debido a que presentan componentes y características técnicas de funcionamiento bastante simples según lo señalado por Martínez (2011) y Neikov (2009). Estos costos referenciales aproximados se observan en la Tabla 28.

La energía producida por las trituradoras de quijadas y de martillos, no es lo suficientemente alta como para facilitar el desarrollo de una reacción, debido a que no se genera el contacto suficiente entre los componentes de la trituradora y el material de alimentación. Lo cual sí sucede con los molinos de bolas pues su propio funcionamiento y características físicas permiten una mayor interacción entre los componentes del molino y el material de alimentación de manera eficiente (Neikov 2009).

Por lo tanto, si bien los costos de construcción de los trituradores son bajos con respecto a los molinos, no se recomienda su uso para procesos que dependan de la energía liberada por estos equipos (Neikov, 2009).

Tabla 28: Costo de trituradoras y molinos

Equipo	Costo (S/.)	Fuente
Trituradora de Martillos	12 249,00	Ver link ⁷
Trituradora de Quijada	24 498,00 – 32 664,00	Ver link ⁸
Molino de Bolas	37 563,60	Ver link ⁹
Molino Planetario de bolas	38 788,50 – 61 245,00	Ver link ¹⁰

Por otro lado, si bien el molino de bolas y el molino planetario presentan altas eficiencias para la generación de energía, la diferencia entre estos radica en su capacidad para ser escalados a niveles de procesamiento industrial. Es decir, los molinos de bolas, al presentar componentes y características técnicas bastante generales, pueden ser diseñados para procesar pequeñas y grandes cargas de material ya sea a nivel de investigación o a nivel industrial. En cambio, los molinos planetarios, por sus componentes y detalles técnicos altamente sofisticados, son generalmente utilizados con fines de investigación y su diseño solo permite el procesamiento de pequeñas cantidades de material (Neikov, 2009).

De lo anterior se concluye que, si bien las trituradoras presentan costos relativamente más bajos a comparación de los molinos, estos no pueden ser utilizados para procesos de estabilización ya que no aportan la energía necesaria para impulsar el desarrollo de una reacción (Neikov, 2009). Y por el lado de los molinos, a comparación de los molinos planetarios, el molino de bolas presenta menores costos de construcción y la posibilidad de procesar pequeñas y grandes cargas de material, lo cual forma parte de los objetivos del presente proyecto.

⁷ Costo de trituradora de martillo: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/High-Performance-gold-ore-hammer-mill-62182324954.html>

⁸ Costo de Trituradora de Quijada: https://spanish.alibaba.com/product-detail/coarse-toggle-plate-seat-jaw-crusher-euro-eccentric-shaft-pe-500-750-stone-jaw-crusher-1600176717720.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.131c54b6bUOEsp

⁹ Costo de Molino de Bolas: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Hot-sale-small-size-ball-mill-62148389393.html>

¹⁰ Costo de molino de bolas planetario: https://spanish.alibaba.com/product-detail/large-horizontal-production-nano-particles-planetary-ball-mill-60682758886.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.83eb2a57q7zOO1&s=p

Por lo tanto, el equipo con mayores ventajas tanto técnicas como de costos de construcción y operación es el molino de bolas. Es por ello por lo que este equipo fue seleccionado para el desarrollo de este proyecto.

4.3 Dimensionamiento del Molino

4.3.1 Cálculo de la carga total de material

La carga total de material se estimó a partir de la cantidad de mercurio y azufre que ingresa al tratamiento. Para su estimación, se tuvo que haber identificado previamente la oferta anual de mercurio total en el país, la cual se muestran en la **Sección 4.1**.

A partir de dicha oferta, se seleccionó la cantidad de mercurio más elevada, considerando el peor de los escenarios para asegurar una mayor cobertura de este elemento. Este valor fue de 282 toneladas.

A partir de las 282 toneladas al año se calculó que el molino debería tener la capacidad de estabilizar 24 toneladas de mercurio al mes, lo cual a su vez significa 0,8 toneladas al día.

Considerando que esta cantidad es bastante elevada y que su disponibilidad, debido a temas principalmente legales, es limitada, se ha optado por elegir un porcentaje de cobertura del molino del 21% con respecto a la oferta total. Esto permitirá obtener una cantidad de mercurio para tratamiento más realista y a su vez simplificar los cálculos estequiométricos. Con ello, la cantidad de mercurio a estabilizar diariamente ya no será de 0,8 toneladas al día sino de 170 kg diarios aproximadamente.

Para elegir el tiempo total de cada ensayo primero se identificó el tiempo más adecuado de reacción. Para ello, se tomó como referencia lo mencionado por Fukuda et al. (2014) y Lecke y Nulf (1994), quienes realizaron ensayos de estabilización de mercurio con azufre en condiciones estándar y obtuvieron resultados óptimos de estabilización en lapsos de 1 hora. Considerando este tiempo de reacción y los procesos adicionales de carga de los insumos (1h) y extracción de los productos del molino (2h) se estimó que en promedio el tiempo total invertido por cada ensayo es de 4 horas.

Con las 4 horas requeridas para el tratamiento de un lote y considerando una jornada laboral promedio de 8 horas, se concluyó que se pueden desarrollar únicamente 2 lotes por día; por lo tanto, se estabilizarán aproximadamente 85 kg de mercurio por lote.

Finalmente, según lo señalado por López et al (2011) quien indica que la reacción de estabilización entre el mercurio y el azufre debe darse en condiciones estequiométricas de 1:1, se estimó la cantidad de azufre a utilizar en cada lote, la cual fue de 13,6 kg. Con ambas cantidades se identificó la carga total de material que ingresará al molino siendo su valor de 98,6 kg. Con fines conservadores se consideró una carga de material de 100 kg.

4.3.2 Cálculo del volumen del molino

López et al. (2011) señala que dentro de un molino de bolas la relación de carga entre las bolas y el material comúnmente se encuentran entre 5/1 y 10/1. Del mismo modo, González (2016) señala que los molinos de bolas industriales manejan relaciones de carga de 7/1, 8/1 y 10/1 como máximo. Teniendo en cuenta lo mencionado y considerando que el molino a diseñar tiene un nivel industrial, se eligió la máxima relación de 10/1 ya que esto va a garantizar un espacio de molienda adecuado para un escenario en el que se necesite trabajar con elevadas cantidades de mercurio.

Con esta relación se concluyó que para estabilizar los 100 kg de material (azufre y mercurio) serían necesarios 1000 kg de bolas de acero. Teniendo esta información, y utilizando la densidad promedio de las bolas de acero de 7850 kg.m^{-3} , se estimó el volumen ocupado por las bolas que fue de $0,13 \text{ m}^3$.

Por otro lado, Neikov (2009) menciona que en un molino de bolas donde se trabaja con materiales granulados y grandes, el volumen de las bolas no debería superar el 30-35% del volumen total del tambor ya que esto influye en la eficiencia y productividad del molino, pues con un llenado excesivo las bolas ascendentes chocarían con las que caen reduciendo la eficiencia de la molienda. Por otro lado, Barrios (2015) menciona que cuando se trabaja con elementos finos, el volumen ocupado por las bolas puede ser incluso menor y de hasta el 25% ya que no es necesario romper y triturar estos materiales por sus propias características físicas. Por lo tanto, debido a que el mercurio y el azufre son elementos finos, se optó por que el volumen ocupado por las bolas sea del 25% del volumen total del tambor. Utilizando este porcentaje y el volumen ocupado por las bolas estimado en el párrafo anterior de $0,13 \text{ m}^3$, se determinó el volumen total del tambor de $0,50 \text{ m}^3$.

4.3.3 Cálculo de las dimensiones del molino

Dueñas & González (2016), señalan que la relación entre la longitud y el diámetro del tambor varían dependiendo del tamaño del molino que se pretende construir. Para el caso de los molinos de laboratorio sugieren que la relación L/D se encuentre entre 1,5 y 1,7; mientras

que para molinos industriales la relación que sugieren es de 2,35/1. Huamán (2015) también señala que a nivel industrial los molinos de bolas pueden alcanzar relaciones L/D de 3/1 cuando se busca obtener un material bastante fino.

Por lo tanto, considerando el material fino que se va a introducir al molino (mercurio y azufre), un escenario conservador donde el volumen del molino es de 0,50 m³ según lo estimado en la **Sección 4.3.2.** y que la relación L/D puede ser de 3/1; se ha optado por diseñar un molino de 1,80 m de largo y 0,60 m de diámetro con una relación L/D de 3/1.

4.3.4 Cálculo del material, tamaño, peso y número de bolas

Una vez identificados el volumen y las dimensiones del tambor, se estimó el tipo de material, tamaño, peso y número de las bolas.

Con respecto al material a utilizar, según Dueñas & Gonzales (2016), uno de los materiales comúnmente utilizados para la fabricación de bolas es el acero forjado, por su gran dureza, alta resistencia al impacto y a la abrasión, tal como se indica en la Tabla 29.

La dureza, densidad y propiedades mecánicas de este material se ajustan a las actividades de molienda que se pretenden desarrollar y a lo recomendado por Alcántara, J. (2008) y Duda, W. (1977), según Dueñas & Gonzales (2016); por lo tanto, se utilizará este material para las bolas de molienda.

El tamaño de bola a utilizar se determinó a partir de una comparación entre los tamaños más comunes del mercado que son de 5 y 10 cm de diámetro. Según Dueñas & Gonzales (2016), cuanto menor es el tamaño de partículas, menor debe ser el tamaño de la bola para obtener la máxima eficiencia de molienda y mezcla. Del mismo modo, las bolas grandes se utilizan principalmente en situaciones donde se busca romper grandes tamaños de material.

Tabla 29: Bolas de acero forjado de alto carbón

	
*Imagen referencial	
Marca:	Aceros Chilca S.A.
Descripción:	Bolas de acero forjado de alto carbón – AISI/SAE 52100
Dureza:	60 – 65 HRC
Propiedades mecánicas	<ul style="list-style-type: none"> - Alta capacidad de soporte de carga - Alta resistencia a la deformación - Alta resistencia al desgaste - Alta resistencia a la corrosión
Densidad:	7850 kg/m ³ – 4520 kg/m ³
Ficha técnica:	https://es.scribd.com/document/407623736/Especificacion-Tecnica-Bolas-Forjadas-Aceros-Chilca-1-a-3-5

Por lo tanto, debido a que la finalidad del molino es principalmente mezclar más que reducir el tamaño de las partículas, y que los materiales con los que se trabajarán son azufre y mercurio¹¹, se utilizará el menor tamaño de bola que corresponde a la de 5 cm de diámetro.

¹¹ El Azufre tiene un tamaño de partícula menor a 60µm. El Mercurio tiene un tamaño de partícula despreciable debido a que se encuentra en estado líquido.

Finalmente, se determinó el número de bolas a partir de su peso promedio, para lo cual se pesaron 10 bolas de acero de 5 cm de diámetro al azar una a una y se obtuvo un peso promedio de 0,574 kg, tal y como se observa en la Tabla 30.

Tabla 30: Peso promedio de bola de acero

N° Bola	Pesos
Bola 1	0,571
Bola 2	0,574
Bola 3	0,574
Bola 4	0,583
Bola 5	0,570
Bola 6	0,570
Bola 7	0,570
Bola 8	0,578
Bola 9	0,574
Bola 10	0,570
Peso Promedio	0,574

Conociendo el peso unitario y total de las bolas que van a intervenir en el proceso, se estimó la cantidad de estas tal y como se muestra a continuación.

Masa total de bolas (M_t): 1000 kg

Masa de cada bola (M_o): 0,574 kg

$$N^{\circ} \text{ bolas} = \frac{M_t}{M_o}$$

$$N^{\circ} \text{ bolas} = \frac{1000kg}{0.574kg}$$

$$N^{\circ} \text{ bolas} = 1742 \text{ bolas}$$

Según Barrios (2015) la cantidad de bolas que se coloca dentro de un molino depende de la cantidad de energía disponible para moverlas y por lo general no debería superar el 50% del volumen. Esto debido a que según Gonzalo (2019), existiría un gasto innecesario de energía que bien podría ser igualada trabajando a un 30% o 40% del volumen. Por ende, la cantidad de bolas estimada se alinea con lo sugerido por estos autores.

La -e todos los datos utilizados y estimados para el dimensionamiento del molino de bolas.

Tabla 31: Resumen de valores utilizados para el dimensionamiento del molino

Dato de entrada	Valor
Cantidad de mercurio ofertado al año (ton)	281,89
Cantidad de mercurio ofertado al mes (ton)	24
Cantidad de mercurio ofertado al día (ton)	0,8
Porcentaje de cobertura del molino	21%
Cantidad de mercurio a estabilizar al día (lunes a viernes) (kg)	170
Tiempo estimado de tratamiento de un lote (Preparación + Operación) (horas)	4
Número de lotes al día	2

Continuación.....		
Dato de entrada	Valor	
Cantidad de mercurio a estabilizar por lote (kg)	85	
Cantidad de azufre a utilizar (kg)	13,6	
Carga total al molino por lote	98,6	
Carga total al molino por lote ajustado (kg)	100	
Relación de carga Bolas/Material	5/1	10/1
Peso del material (kg)	100	100
Peso de las bolas (kg)	500	1000
Diámetro de las bolas (m)	0,05	
Densidad de una bola de acero forjado	7850 kg/m ³	
Volumen de las bolas (m ³)	0,13	
Volumen teórico del tambor	volumen de las bolas / 25%	

Continuación.....	
Dato de entrada	Valor
Volumen del tambor (m ³)	0,50
Relación Longitud/Diámetro	3/1
Longitud (L) (m)	1,80
Diámetro (D) (m)	0.60
Peso de cada bola	0,574 kg
Peso total de las bolas	1000 kg
Número de bolas	1742 unidades

4.4 Parámetros de operación

Utilizando información secundaria, se identificaron aquellos parámetros que influyen directamente en la etapa de operación del molino: velocidad de rotación, temperatura, presión y tiempo de operación.

4.4.1 Velocidad de rotación

La velocidad de rotación se calculó utilizando la ecuación de la velocidad crítica propuesta por Neikov (2009), quien además indica que este valor debe ser entre el 65 a 80% de la velocidad crítica. Esta velocidad de operación es referencial para todos los molinos de bolas convencionales que son utilizados para moler minerales granulados de gran dureza y tamaño

La velocidad de rotación se estimó de la siguiente manera:

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{Dm}}$$

Donde:

V_c: Velocidad crítica de rotación (RPM)

Dm: Diámetro del molino (metros)

Vo: Velocidad óptima de operación

$$Vc = \frac{42,3}{\sqrt{0.60}}$$

$$Vc = \frac{42,3}{\sqrt{Dm}}$$

$$Vc = 54,6 \text{ rpm}$$

El 80% de esta velocidad sería: $Vo = 0,8 * 54,6 \text{ rpm}$

$$Vo = 43,36 \text{ rpm}$$

Si bien este valor representa la velocidad de rotación óptima del molino funcionando en su máxima capacidad, Guerrero (2016) indica que la velocidad no solamente depende de la fuerza centrífuga y el diámetro del molino, sino también de la carga del material, las bolas y el tipo de material. Por lo tanto, es comprensible que los valores de la velocidad de rotación varíen durante los ensayos preliminares de estabilización, ya que las pruebas se hicieron con cantidades proporcionales mínimas de mercurio que se detallarán en la **Sección 4.6**.

4.4.2 Temperatura

Según Dickson & Tunell (1959), la temperatura del molino no debería superar los 400 °C para evitar la descomposición del sulfuro de mercurio (metacinabrio) y evitar potenciales accidentes por aumentos de presión que se reducirían en una explosión. Por lo tanto, se estimó la temperatura aproximada que alcanzaría el molino, de acuerdo con sus características de diseño tales como el tipo de material, carga, etc.

Para ello, primero se identificó el tiempo de contacto necesario para lograr un incremento de calor equivalente a la energía de activación de la reacción entre el mercurio y el azufre de 55 kcal/mol. Tomando como referencia los cálculos realizados por Leckey & Nulf (1994) se observó que para 100 kg de sulfuro de mercurio el tiempo de contacto se encuentra en un rango de 45 a 50 min.

Luego se estimó la temperatura de contacto utilizando la **ecuación 05** propuesta por Bhattacharya & Arzt (1992), la cual requiere de los parámetros identificados en la Tabla 32

$$T_c = \frac{Q}{2\pi r_o^2 \rho_s c_{ps} \sqrt{\pi \alpha_s \Delta t}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r_o^2}{4\alpha_s \Delta t}\right) \right\}$$

..... **Ecuación 05**

Donde ρ_s y c_{ps} son la densidad y calor específico del material de la bola de acero; α_s es la difusividad termal; r_o es el tamaño de partícula y Δt es el tiempo de contacto.

Tabla 32: Parámetros de diseño para el tiempo de contacto

Q (J)	r_o (m)	ρ_s (kg/m ³)	c_{ps} (J/kg.K)	α (m ² /s)	Δt (s)	Tc (°C)
98908278,17	0,0005	7850	50	0,0000228	3000	304,75

“Q” fue estimado a partir de la carga de 100 kg de sulfuro de mercurio y 55 kcal/mol; el tamaño de partícula “ r_o ” fue obtenido de Barrios (2015) quien indica que un molino de bolas con descarga tipo overflow produce partículas de entre 0.3 y 0.8 mm de tamaño por lo que se tomó el promedio de 0.5mm. Para el caso de la densidad se tomó como referencia lo señalado por Barrios (2015) quien indica que las bolas de acero forjados tienen una densidad aproximada de 7850 - 7900 kg/m³. Siguiendo con el calor específico “(Cps)” de las bolas, este fue obtenido de Bhattacharya & Arzt (1992) quien indica que es de 50 J/kg.k. Para la difusividad termal del acero, esta se obtuvo de Netzsch (2021) donde se indica que el acero presenta un valor de 22,8 mm²/s. Por último, se encuentra el tiempo de contacto que ya se calculó previamente.

Luego se reemplazaron estos valores en la **ecuación 05** y se estimó que la temperatura de contacto alcanzaría los 304 °C, lo cual cumple con lo señalado por Dickson & Tunell (1959) de no sobrepasar los 400°C, por lo que se concluye que el diseño del molino cumple con el parámetro de temperatura.

4.4.3 Presión

El metacinnabrio se descompone por acción de la temperatura, lo cual genera un aumento en la presión de vapor de la mezcla que puede alcanzar valores de 1,45 mmHg a 331,5°C hasta 2385 mmHg a 651°C (Rinse 1928, Dickson & Tunell 1959).

Con la información brindada por Rinse (1928) y Dickson & Tunell (1959) se estimó que la presión óptima del molino durante el ensayo de estabilización no debería sobrepasar el valor máximo de 12 mmHg ya que a esta presión la temperatura alcanza los 400°C que es la temperatura límite a partir del cual el metacinnabrio se comienza a descomponer. Ya que, de la misma forma que la temperatura, manteniendo la presión por debajo del límite sugerido se evitan potenciales explosiones por un aumento excesivo de la presión.

4.4.4 Tiempo de operación

Fukuda et al (2014) señala que resultados óptimos de estabilización de mercurio en la forma de sulfuro de mercurio se lograron en 60 minutos de tratamiento. De igual manera, Leckey & Nulf (1994) mencionan que el tiempo de contacto óptimo para que se genere la energía de activación que favorecerá la reacción de estabilización se encuentra entre 45 y 50 min. Teniendo en cuenta que ambos autores realizaron sus ensayos en condiciones estándar, lo cual se asemeja en lo planteado en esta investigación, se ha optado por realizar los ensayos con un tiempo de 60 minutos.

4.5 Construcción del molino

4.5.1 Elaboración de los planos

La elaboración de los planos correspondientes al molino de bolas y su sistema de extracción de gases se realizó utilizando el software AutoCAD y las medidas identificadas durante el dimensionamiento. Estos planos se encuentran en los ANEXOS 5-10 y constan de un Molino de bolas en vista frontal, lateral y posterior incluyendo el sistema de extracción de gases y sus componentes que son el condensador, el filtro de carbón y el Chiller.

4.5.2 Selección del material de construcción

Según Ratto (1963) y Abril (2018) el acero con mejor resistencia al impacto y a la abrasión, así como el más utilizado en la construcción de los molinos de bolas, es el Acero Austenítico al manganeso o Acero Hadfield. Por lo tanto, este fue el material utilizado para la construcción del tambor del molino.

Para los soportes se utilizó Acero al Cromo AISI/SAE 52 100 ya que según González (2016) este material presenta una alta capacidad de soporte de carga, gran dureza, alta resistencia a la deformación y alta resistencia a la corrosión. Lo cual se ajusta a la necesidad de contar con soportes que resistan el peso y movimiento rotatorio del molino.

Para la estructura de cobertura se utilizó Acero galvanizado #18 ya que según González (2016) es el más utilizado para elaborar carcasas de molinos debido a que son resistentes a la corrosión, presentan gran rigidez estructural, y son de fácil y bajo costo de manufactura.

4.5.3 Selección del motor

El motor fue seleccionado a partir de la potencia, la cual fue determinada mediante la ecuación empírica de Bond (1961) que estima la potencia de un molino de bolas de Overflow (García & Diaz, S.f.). Esta ecuación se muestra a continuación:

$$Kwb = 2,8 * D^{0.4} * (3.2 - 3Vp) * Cs * \left(1 - \frac{0.1}{2^{9-10Cs}}\right)$$

Donde “D”, es el diámetro del molino en pies; kWb, es la potencia en kW por tonelada de bolas de molino; Vp, es el porcentaje del volumen de molino cargado con bolas y Cs, es el porcentaje de la velocidad crítica.

Reemplazando estos valores en la ecuación, se obtuvo que la potencia es igual a 4 kW, lo cual en HP equivale a 5,36 HP.

Teniendo en cuenta ello y la necesidad de mantener un margen de potencia para evitar sobrecalentamientos del motor, se seleccionó el motor de la marca WEG (2017) de modelo IE4 con una potencia conservadora de 11 kW y se le acopló un motorreductor de la marca FUJI (S.f.) modelo 132 M de Clase E y potencia de salida de 7,5 kW para controlar la potencia de rotación del molino.

4.5.4 Construcción del molino y sus componentes

Con ayuda de los planos y una vez seleccionados los materiales a utilizar, se construyó el molino de bolas empezando por el tambor y las tapas, para lo cual se utilizaron planchas de acero Hadfield ASTM 128 de 15 mm de espesor. El largo y el diámetro resultaron de 1,80 y 0,61 m, respectivamente. (Ver ANEXO 11)

Adicionalmente, en las paredes del tambor se colocó un sistema de tres paletas equidistantes, cuya finalidad es actuar como impulsores para incrementar la energía cinética y potencial de

las bolas al arrastrarlas hasta cierta altura y evitar que se queden en el arco inferior del tambor actuando como una mecedora (Botero, 2005). (Ver ANEXO 12)

Para los soportes se utilizó Acero al Cromo AISI/SAE 52 100 ya que según González (2016) este material presenta una alta capacidad de soporte de carga, gran dureza, alta resistencia a la deformación y alta resistencia a la corrosión

Paralelamente, se construyó la carcasa del molino utilizando Acero Galvanizado #18 de 10 mm de espesor, con un largo y diámetro de 2 y 1 m respectivamente. (Ver ANEXO 13)

El sistema de alimentación y descarga fue construido según las recomendaciones de Ratto (1969), quien indica que a comparación de los molinos con descarga de tipo Rejilla o de descarga Central, los molinos con descarga del tipo Overflow generan menos impacto en las paredes del molino debido a que tienen mayor cantidad de pulpa que absorbe parte del impacto y, por otro lado, facilitan los procesos de carga y descarga del material por la ubicación de sus compuertas de entrada y salida, que pueden estar ubicados ya sea en la parte delantera y posterior del molino o solamente en una de ellas. Esto permite que se prolongue el tiempo de vida útil del equipo y se mejore la eficiencia de este. Por lo tanto, se optó por construir el molino con este tipo de sistema, pero considerando únicamente una única compuerta de carga y descarga debido a la ubicación del motor en la parte posterior del molino (Ver ANEXO 15).

El molino se instaló a 1.5 metros de altura mediante unos soportes móviles de acción mecánica, los cuales permiten en general que el molino con diámetro externo de 1 m pueda girar sobre su propio eje y variar el nivel de la altura del tambor durante los procesos de alimentación y descarga con ayuda de un sistema de elevación mecánico tipo “gata” instalado en la base posterior. (Ver ANEXO 17 y ANEXO 18).

4.5.5 Sistema de extracción de gases

Se acopló un sistema de extracción de gases aéreo en la compuerta de carga del molino. Este estuvo compuesto principalmente por una campana de extracción de gases, un condensador, un filtro de carbón, un chiller y tuberías de latón (Ver ANEXO 19-22). Dentro de la planta ya se contaba con todos los equipos que conforman el sistema de extracción, lo cual facilitó su implementación y conexión con el molino mediante las tuberías de latón. (Ver ANEXO 23)

4.6 Ensayos de estabilización

Los ensayos de estabilización fueron realizados asegurando que todo el personal cuente con los equipos de protección personal adecuados para la manipulación de mercurio. Estos fueron seleccionados teniendo en cuenta la recomendación del PNUMA (2019), desarrollada en la Sección 2.16. En el ANEXO 24 se muestran las fichas técnicas de los equipos de protección utilizados durante los ensayos.

4.6.1 Preparación de los insumos

Considerando lo sugerido por López et al (2011), se pesaron 15 kg de mercurio y 2,4 kg de azufre en condiciones estequiométricas para evaluar las tres diferentes relaciones sugeridas de bolas/carga de 5/1, 7/1 y 10/1. En estas solo varía la cantidad de bolas, por lo que se consideró una misma cantidad de azufre y mercurio para cada ensayo.

El peso de las bolas fue identificado en función a las relaciones de carga obteniéndose valores de 87 kg, 122 kg y 174 kg, respectivamente.

4.6.2 Etapa de carga

Con los insumos y las bolas pesadas, se abrió la tapa del tambor del molino. Este proceso tomó aproximadamente entre 15 a 25 min. Después, se introdujeron 87 kg de bolas y finalmente se introdujeron el azufre y el mercurio de 2,4 y 15 kg, respectivamente. Este mismo proceso se realizó para los pesos de bolas de 122 y 174 kg.

Finalmente se colocó la tapa y se selló la entrada de alimentación, en un tiempo aproximado de 15 a 25 min.

4.6.3 Etapa de operación

Una vez cargado el molino con los insumos necesarios, se encendió el motor y se anotó la hora de inicio junto a la temperatura inicial de las paredes externas del molino, la cual funcionó como un indicador del incremento de temperatura. La temperatura se midió cada 30 min hasta llegar al tiempo de operación estimado de 60 minutos. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 33: Temperatura externa del molino durante la etapa de operación

Código de Muestra	Ensayo	Fecha	Temperatura (°C)		
			Min 0	Min 30	Min 60
SM01-03M1	E1	03-may	24,9	29,1	30,9
SM01-04M2	E2	04-may	22	24,5	27,5
SM01-04M3	E3	04-may	27,4	27,4	27,1

Se puede observar que el ensayo E1 alcanzó una mayor temperatura al final de la operación. Esto pudo deberse a un mayor contacto entre las bolas y las paredes del molino, ya que según Gonzales y Dueñas (2016) disminuyendo la cantidad de bolas, se disminuye el contacto entre estas, lo cual incrementa el contacto entre las bolas y las paredes del tambor.

También se puede observar que la temperatura en el ensayo E3 se mantuvo constante, incluso llegando a disminuir al final de la operación. Esto pudo deberse a una disminución en la velocidad de giro del molino debido a un mayor peso de bolas, lo cual disminuyó la intensidad de fricción y por ende la temperatura (Gonzales & Dueñas, 2016).

La medida de la temperatura externa del molino funcionó como un indicador de la variación de la temperatura interna del tambor debido a la falta de un termómetro que se ajuste a las características de diseño y operación del molino. Así mismo, por la baja temperatura obtenida en el producto formado, se puede afirmar que no se ha sobrepasado la temperatura límite de descomposición de 400°C sugerida por Dickson & Tunell (1959).

Durante esta etapa también se midió la velocidad de rotación o RPM del molino durante los tres ensayos E1, E2 y E3, para la potencia estimada del motorreductor de 7,5 kW. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 34: Velocidad de rotación del molino (RPM)

Código de Muestra	Ensayo	Fecha	RPM
SM01-03M1	E1	03-may	60
SM01-04M2	E2	04-may	58
SM01-04M3	E3	04-may	55

De esta tabla se puede observar que existe una disminución proporcional en la velocidad de cada ensayo. Esto se debe al aumento del peso total de las bolas, la cual disminuye la velocidad de rotación al ejercer más presión sobre las paletas internas del tambor.

Adicional a ello, se observa que las velocidades obtenidas durante los ensayos no se asemejan a la velocidad de rotación de 43 RPM estimada en la Sección 4.4.1. Esto podría deberse a que la ecuación propuesta por Neikov (2009) se dirige principalmente a los molinos de bolas utilizados para la molienda de minerales de gran tamaño y dureza.

En nuestro caso, el molino diseñado trabaja únicamente con dos elementos cuyos tamaños de partícula son prácticamente despreciables, y las cantidades utilizadas para el ensayo son mínimas en comparación con la cantidad estimada en el diseño. Por lo tanto, es claro que las RPM, teniendo en cuenta la potencia del motor y una menor resistencia a la rotación, sean mayores al valor identificado.

Esto también se sustenta con lo mencionado por Guerrero (2016) quien indica que la velocidad no solamente depende de la fuerza centrífuga y el diámetro del molino, sino también de la carga del material, las bolas y el tipo de material.

4.6.4 Etapa de descarga

Terminada la etapa de operación, se inclinó el molino con ayuda de una gata mecánica colocada en la parte trasera de este, con la finalidad de facilitar el proceso de extracción por gravedad. Luego abrió la compuerta de alimentación que también funciona como sistema de descarga y se recibió el material en unos coches metálicos.

Cabe señalar que para evitar que quede material residual dentro del molino, se volvió a cerrar la compuerta y se puso en operación el molino inclinado durante 1 minuto para hacer que la

vibración empuje todo el material hacia la compuerta. Este proceso tomó 25 minutos en promedio ya que se tuvo que abrir y cerrar la compuerta unas 4 veces aproximadamente.

Finalmente, de cada lote producido se extrajo 0,5 kg de muestra para su envío al laboratorio SGS, donde se realizó el análisis de mercurio lixiviable.

La siguiente tabla resume las cantidades de insumos utilizados para cada ensayo, la cantidad de bolas por carga, la fecha de su realización y la cantidad de producto obtenido.

Tabla 35: Insumos utilizados en cada ensayo

Código de Muestra	Ensayo	Fecha	Relación Bolas/Material	Mercurio (kg)	Azufre (kg)	Bolas (kg)	Producto obtenido (kg)
SM01-03M1	E1	03-may	5: 1	15	2,4	87	14,940
SM01-04M2	E2	04-may	7: 1	15	2,4	122	14,225
SM01-04M3	E3	04-may	10: 1	15	2,4	174	16,164

Los ensayos E1 y E2 presentan una menor cantidad de producto debido a las pérdidas generadas durante la descarga y a la acumulación de material en las paredes del tambor; lo cual se trató de evitar en el último ensayo (E3), haciendo más eficiente el proceso de descarga mediante un mejor posicionamiento de los carritos receptores y una mejor extracción del material acumulado en las paredes.

4.7 Ensayo TCLP

Las 03 muestras extraídas de la etapa de descarga fueron enviadas al laboratorio SGS para realizar el test de “Toxicity Characteristic Leaching Procedure” (TCLP) método EPA 1311 y la determinación de los metales totales en el extracto de TCLP por el método EPA 6020B, Rev 02: 2014.- Espectrometría de Masas de Inductively Coupled Plasma (ICP) para mercurio. Los resultados de esta evaluación se muestran en la Tabla 36 y el informe de ensayo reportado por el laboratorio se encuentra en el ANEXO 4.

Tabla 36: Resultados del ensayo TCLP

Muestra	Fecha	Relación	Hg mg/L
			lixiviado
SM01-03M1	03-may	5: 1	0,099
SM01-04M2	04-may	7: 1	1,633
SM01-04M3	04-may	10: 1	0,082

Se esperaba que de los tres ensayos realizados se obtuvieran valores similares, ya que según López et al (2011) y Salas & Benavidez (2015) la eficiencia del proceso de estabilización depende principalmente de la proporción de azufre y mercurio en la carga, más no del equipo utilizado. Sin embargo, se observa que el ensayo de relación 7:1 no cumple con el valor límite de referencia establecido por la NSW-EPA de 0.2 mg/L para considerar al mercurio como un residuo no peligroso y disponerlo en un relleno sanitario. Esto se debió a que la compuerta no fue sellada adecuadamente durante la etapa de carga, lo que ocasionó una pérdida de presión y calor durante la operación, que fue confirmado con la presencia de mercurio residual debajo del molino al finalizar este proceso.

Por otro lado, los otros dos ensayos de 5:1 y 10:1 sí cumplieron con el límite permitido de la NSW-EPA, presentando eficiencias del 99,34% y 99,45% para los valores de 0,099 y 0,082 mg/L, respectivamente. La relación más eficiente la mostró el ensayo E3 con la relación de carga 10:1.

Estos valores son relativamente similares a los obtenidos por Salas & Benavides (2015) en su estudio de estabilización de mercurio, donde señalan que los valores más eficientes de mercurio lixiviable que obtuvieron de sus ensayos TCLP fueron de 0,066 mg/L y 0,044 mg/L. Otros autores como López et al (2011) también obtuvieron valores de 0,031 mg/L de mercurio lixiviable.

Por lo tanto, el molino de bolas diseñado presenta características técnicas y operacionales adecuadas para estabilizar mercurio, pues las eficiencias alcanzadas se asemejan a las obtenidas por otros autores, además de que se cumplen con los límites establecidos por normativas internacionales como la NSW-EPA de Australia.

V. CONCLUSIONES

Se ha diseñado y construido un molino de bolas con características técnicas y operacionales adecuadas para estabilizar mercurio metálico, con una eficiencia máxima de 99,45% para la relación de bolas/carga de 10/1 y una concentración de mercurio residual lixiviable de 0,082 mg/L.

Se ha dimensionado un molino de bolas de 1,80 m de largo y 0,60 m de diámetro, tomando como referencia principal la oferta máxima de mercurio del país de 282 ton/año y la capacidad de cobertura del molino propuesta de 21% lo cual estima un tratamiento de 60 toneladas de mercurio al año.

Se han evaluado y seleccionado las condiciones de velocidad de rotación (43 RPM), temperatura (300°C), presión (12 mmHg) y tiempo de operación óptimas (60 min) para el molino de bolas diseñado.

Dentro de los requerimientos energéticos del molino, se ha identificado la energía de activación para la formación de sulfuro de mercurio de 180,75 kJ/mol, así como la potencia requerida por el molino diseñado de 5.36 HP.

Finalmente, se ha determinado la eficiencia del proceso de estabilización para los tres ensayos planteados E1, E2 y E3 obteniéndose concentraciones de mercurio residual lixiviable de 0,099, 1,633 y 0,082 mg/L con eficiencias del 99,34%, 89,11% y 99,45%, respectivamente.

VI. RECOMENDACIONES

- Para estimar la oferta total de mercurio se hicieron muchas asunciones del flujo nacional e internacional de mercurio debido a la poca disponibilidad de información, por lo que se recomienda que, en un futuro, con el avance de las investigaciones, se puedan precisar con mayor detalle los cálculos realizados.
- Se recomienda un análisis más profundo de los aspectos termodinámicos de la reacción de estabilización, para identificar y comprender mejor los factores fisicoquímicos que influyen en la eficiencia del proceso.
- Se recomienda identificar y evaluar las especies químicas de azufre formadas durante el proceso de estabilización, así como la influencia de estas en el producto formado y la reacción en general.
- Se recomienda evaluar la eficiencia de la reacción comparando dos tamaños de bolas de 5 y 10 cm de diámetro para las relaciones de carga de 1/5, 7/5 y 10/5.
- Se recomienda la instalación de un sistema de monitoreo de mercurio gaseoso en tiempo real capaz de detectar concentraciones mínimas de mercurio para garantizar que, durante todo el ensayo, el personal no se encuentre expuesto a este elemento. También será muy útil para detectar fugas.
- Para posteriores diseños, se recomienda reemplazar el sistema hidráulico mecánico por uno automático para acelerar y facilitar el proceso de descarga.
- Se recomienda realizar ensayos variando los tiempos de tratamiento para evaluar la eficiencia de los 60 minutos recomendados por otros autores.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Method 1311- procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP). (Documento técnico normativo). Recuperado de: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/1311.pdf>
- Agency for toxic substances and disease registry (ATSDR). (1999). Toxicological profile for mercury. U.S. department of health and human services. Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry 1999
- Alcántara Valladares J.R. (2008). Diseño práctico de un molino de bolas. (Tesis Profesional Ingeniero Mecánico). Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional AZCAPOTZALCO, Instituto Politécnico Nacional, México.
- Álvarez, B. (2010). Análisis de la influencia de los modelos de distribución de tamaños de partículas en la determinación de consumos energéticos en molienda mediante el método de bond. (Tesis de acceso abierto, Universidad de Oviedo, Asturias-España). Recuperado de:
<https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=uQ6UYTD6r2E%3D>
- AMAP/UNEP. (2013). Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway/UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland. vi + 263 pp. Recuperado de: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8427>
- Aparicio, L. (2015). El mercurio en la cuenca del Tambopata – Repercusiones en la salud humana y del ecosistema. (Tesis de Maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1164>
- Arana, M. (2009). El caso del derrame de mercurio en Choropampa y los daños a la salud en la población rural expuesta. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública, 26(1), 113-18, ISSN 1726-4634. Recuperado de:

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342009000100019

- Ballirano, P.; Botticelli, M.; Maras, A. (2013). Thermal behaviour of cinnabar, α -HgS, and the kinetics of the β -HgS (metacinnabar) \rightarrow α HgS conversion at room temperature. *European Journal of Mineralogy*. 25. 957-965. Doi: 10.1127/0935-1221/2013/0025-2341
- Barrios, M. (2015). Optimización de los sistemas de control de un molino de bolas. (Tesis para optar el título de Ingeniero Electrónico, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú). Recuperado de:
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/3153/IEbasamg.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bhattacharya, A. & Arzt, E. (1992). Temperature rise during mechanical alloying. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 27(6), 749-754, ISSN 0956-716X. doi: [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(92\)90500-E](https://doi.org/10.1016/0956-716X(92)90500-E)
- Bolaños, V. (2006). Diseño de un molino de bolas de baja energía. (Pasantía para obtener el título de Ingeniero Mecánico, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali-Colombia). Recuperado de:
<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/6196/T04203.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bond, F. C. (1961). *Crushing & Grinding Calculations*. British Chemical Engineering, 378-385, 543-548.
- Botero, F. (2005). Diseño de bolas de un molino tipo atritor. (Trabajo de investigación para obtener el grado de Ingeniero Mecánico, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia). Recuperado de:
<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/6195/T04202.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cancillería de Colombia. (S.f.). Convenio de Minamata sobre Mercurio. (Nota informativa Web). Recuperado de: <https://www.cancilleria.gov.co/convenio-minamata-sobre-mercurio>
- Ccolqque, E. (2019). Contaminación minera en el área sur-medio del Perú por la minería del oro a pequeña escala. (Trabajo de investigación para obtener el grado de Master en

- Ingeniería de Minas, Universidad Politécnica de Catalunya, España). Recuperado de:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/174074/TFM%20Elsa%20Cco1qqe.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chambi, D. (2015). Diseño de un molino de bolas para la corporación Minera Ananea S.A.C. (Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Metalurgista, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú). Recuperado de:
http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/1923/Chambi_Condori_Dayasi.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Congreso de la República. (1997). Ley Nro. 26842: Ley General de Salud. *Normas Legales*, (1), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Congreso de la República. (2017). Ley Nro. 28611: Ley General del Ambiente. (Art. 83. Del control de materiales y sustancias peligrosas). Recuperado de:
<https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-28611.pdf>
- Corporación de acero. (2006). Ficha técnica de lámina galvanizada lisa de calidad comercial. Recuperado de: <https://www.yumpu.com/es/document/read/14600449/lamina-galvanizada-lisa-corpacero>
- Del solar, S. (2017). Complejo Minero Santa Bárbara de Huancavelica, Perú. (Formulario de presentación a la lista indicativa del patrimonio mundial, Región de Huancavelica-Perú). Recuperado de:
https://patrimoniomundial.cultura.pe/sites/default/files/li/pdf/Santa%20B%C3%A1rbara_Ficha%20Lista%20Indicativa_Esp.pdf
- Del Valle, C. (2006). Ciclo de vida y análisis de riesgos del cianuro en la planta de procesos de Orcopampa. (Tesis de maestría internacional aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú). Recuperado de:
https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9_n17/a07.pdf
- Dickson, Frank & Tunell, G. (1959). The stability relations of cinnabar and metacinnabar. *American Mineralogist*, 44. 471-487.

- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal L 327, 22/12/2000; 0001-0073
- Duda, W. H., (1997), Manual Tecnológico del cemento. Editores técnicos Asociados S.A., Barcelona, España. Recuperado de:
http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_sogamoso/pregrado/minas/documentos/DISEÑO_DEL_METODO_DE_EXPLORACION_PARA_LA_MINA_DE_ARCILLA_ASOGUAYABAL.pdf
- Dueñas, J. & González, V. (2016). Diseño y construcción de un molino de bolas para la pulverización de arcillas en el laboratorio de materiales y catálisis de la universidad de Córdoba. (Proyecto de grado para obtener el título de Ingeniero Mecánico, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia). Recuperado de:
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/672/TRABAJO%20ODE%20GRADO%20FINAL%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Esdaile, L. & Chalker, J. (2018). The mercury problem in artisanal and small-scale gold mining. *Chemistry – A European Journal*, 24(27): 6905-6916. Doi:
<https://doi.org/10.1002/chem.201704840>
- Esparza, J. (S.f.). Técnicas para la proyección de datos. (Información de docencia, Universidad de Quintana Roo, México). Recuperado de:
<http://web.uqroo.mx/archivos/jlesparza/UnidadII-ACPSC-137%20Proyeccion.pdf>
- European Environment Agency (EEA). (2018). Mercury in Europe's environment. (Reporte técnico informativo N° 11/2018). Recuperado de:
<https://www.eea.europa.eu/publications/mercury-in-europe-s-environment>
- Fernanda, G. (2018). Mercurio en el suelo, contaminación y remediación. (Trabajo de fin de grado, Universidad Complutense, Madrid). Recuperado de:
<http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GISELA%20FERNANDA%20CAIZA%20CAIZA.pdf>
- Fiorella Representaciones S.A.C. (2020). Planchas de acero ASTM A36. (Ficha técnica de las planchas de acero A36). Recuperado de:
<https://www.fiorellarepre.com.pe/FichaTecnica/605020.pdf>

- Fuji Electric. (S.f.). New Series Standard Induction Motor with Class E Insulation. (Documento técnico informativo). Recuperado de:
https://www.fujielectric.com/company/tech_archives/pdf/10-04/FER-10-04-130-1964.pdf
- Fukuda, N.; Takaoka, M., Oshita, K., & Mizuno, T. (2014), Stabilizing conditions of metal mercury in mercury sulfurization using a planetary ball mill. *Journal of Hazardous Materials*, S0304-3894(14)00332-X. doi:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.063>
- Gaona, X. (2004). El mercurio como contaminante global. (Memoria técnica para aspirar al grado de Doctor en química, Universidad Autónoma de Barcelona, España).
<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3174/xgm1de1.pdf>
- García, J. & Diaz, F. (S.f.). Diseño del prototipo de un molino de bolas para laboratorio. (Información Pública de oficio de México) Recuperado de:
https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo3/2019/44020/1/c2da996526c5953a41f2d6669515a6cf.pdf
- Gavin, B., Camacho, A., Jimenez, G. & Mariz, M. (2020). Mercury Challenges in México: Regulatory, Trade and Environmental Impacts. *Atmosphere*, Vol. 12, pp. 57. Doi:
<https://doi.org/10.3390/atmos12010057>
- Gonzalo, J. (2019). Análisis de los parámetros del molino de bolas en la producción de la planta concentradora en Milpo. (Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú). Recuperado de:
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5386/T010_73815655_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gorin A.H., Leckey, J.H. & Nulf L.W. (1994). Final disposal options for mercury/uranium mixed wastes from the Oak ridge reservation. Reporte. Recuperado de:
https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc679562/m2/1/high_res_d/290905.pdf
- Guerrero, J. (2016). Optimización del consumo energético de un molino de bolas variando la velocidad de rotación. (Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Metalurgista, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú). Recuperado de:
http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/4560/1/guerrero_vj.pdf

- Gupta, R.; Milatovic, D.; Lall, R.; & Sristava, A. (2018). Mercury. *Veterinary Toxicology* (Third Edition). 455-462. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811410-0.00031-3>
- Huaman, P. (2015). Evaluación de parámetros para el diseño de un molino de bolas en la empresa administradora cerro S.A.C. - pasco – 2015. (Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalurgista, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Pasco, Perú). Recuperado de:
http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/253/1/T026_45402139T.pdf
- Leckey, J.H. & Nulf, L.E. (1994). Thermal Decomposition of Mercuric Sulfide. US Department of Energy Technical. Report Y/DZ1124. Recuperado de:
https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc688573/m2/1/high_res_d/41313.pdf
- Legendre, D. & Zevenhoven, R. (2014). Assessing the energy efficiency of a jaw crusher. *Energy*, 74. 119–130. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.036>
- López, A., López, F., Alguacil, F. & Alonso, M. (2011). Procedimiento de estabilización de mercurio líquido mediante cemento polimérico de azufre, vía sulfuro de mercurio. (Solicitud de patente, Oficina española de patentes y marcas, España). Recuperado de: https://digital.csic.es/bitstream/10261/40330/1/2355001_A1.pdf
- López, F.; López-Delgado, A.; Padilla, I.; Tayibi, H.; & Alguacil, F. (2010). Formation of metacinnabar by milling of liquid mercury and elemental sulfur for long term mercury storage. *Science of the Total Environment*, 408(2010): 4341-4345. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.07.008
- Madelung O., Rössler U., & Schulz M. (1999). Mercury sulfide (HgS) thermodynamic properties: Datasheet from Landolt-Börnstein - Group III Condensed Matter · Volume 41B: "II-VI and I-VII Compounds; Semimagnetic Compounds" in Springer Materials. Doi: (https://doi.org/10.1007/10681719_655).
- Martínez P. (2011). Procesamiento de materiales. (Curso: Tecnología Mineralúrgica, Base de Datos). Universidad politécnica de Cartagena. Recuperado de:
<https://ocw.bib.upct.es/course/view.php?id=88&topic=>
- Martínez, J. & Díaz, F. (2019). Diseño del prototipo de un molino de bolas para laboratorio. (Artículo científico). Recuperado de:
https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo3/2019/44020/1/c2da996526c5953a41f2d6669515a6cf.pdf

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (S.f.). Ley 1658 de 2013. (Plataforma web del ministerio del ambiente de Colombia). Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/ley-1658-de-2013/>
- Ministerio de Salud del Perú. (2010). Mercury: important by-product from Peru's large scale gold mines. (Reunión de consulta sobre residuos y almacenamiento). Recuperado de: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/12919/4-4_PERUcountrypresentation.pdf?sequence=1&isAllowed=1
- Ministerio del Ambiente. (2016). Convenio de Minamata sobre Mercurio: ratificación peruana. Lima, 197 pp. Recuperado de: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/07/Convenio-de-Minamata-sobre-Mercurio-Ratificacion-peruana.pdf>
- Misnaza, F., Mosquerea, J., Pantoja, G. & Rodríguez, K. (2006). Precipitación de oro en solución mediante el proceso Merrill Crowe. (Informe final de laboratorio, Universidad del valle, Santiago de Cali-Colombia). Recuperado de: http://recordcenter.sgc.gov.co/B8/22004000018066/documento/nativos/71_Public_Espec_Tecn_mineral_qcas_metal_menas%20auríferas/Links/Jica%20Imágenes%20RETOCADAS/Cap%C3%ADulo%20metalurgia/GraficasOriginales%2010/Merrill-Crowe.pdf
- Monteagudo, F. (2002). Evaluación de la contaminación por mercurio en población de mineros artesanales de oro de la comunidad de Santa Filomena – Ayacucho-Perú. (Tesis para optar el título profesional de Químico Farmacéutico, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú). Recuperado de: https://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/Tesis/Salud/Monteagudo_M_F/t_completo.pdf
- Moya, P. (2018). Protocolo de diseño para la fabricación de molino semiautógeno con accionamiento sin engranajes. (Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, Universidad del Altiplano, Puno, Perú). Recuperado de: http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/8560/Moya_Arcana_Wilder_Pedro.pdf?sequence=1&isAllowed=1
- Neikov, O. (2009). Mechanical Crushing and Grinding. Handbook of Non-Ferrous Metal Powders, 47-62. Doi: 10.1016/B978-1-85617-422-0.00002-1

NSW-EPA 2014. Waste Classification Guidelines – Part 1: Classification of waste. Disponible en: <https://www.epa.nsw.gov.au/your-environment/waste/classifying-waste/waste-classification-guidelines>

Open Course Ware. (S.f.). Reducción de tamaño, Molienda (I). (Material docente de contenido abierto). Recuperado de: https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5547/mod_resource/content/1/Tema_4_-_Molienda_I_.pdf.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). La minería aurífera artesanal o de pequeña escala y la salud. Documento Técnico N°1: Riesgos para la salud relacionados con el trabajo y el medioambiente asociados a la extracción de oro artesanal o a pequeña escala. Recuperado de: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/259452/9789243510279-spa.pdf;jsessionid=980898671B7405E4720FC60A1DFF8C6B?sequence=1#:~:text=La%20miner%C3%ADa%20aur%C3%ADfera%20artesanal%20y,el%20Medio%20Ambiente%2C%202014>).

Organización Mundial de la Salud (OMS). (31 de marzo de 2017). Re: El mercurio y la salud. [Datos y cifras del sitio web mundial]. Recuperado de: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health#:~:text=La%20exposici%C3%B3n%20al%20mercurio%20\(incluso,los%20pulmones%20ri%C3%B1ones%20y%20ojos](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health#:~:text=La%20exposici%C3%B3n%20al%20mercurio%20(incluso,los%20pulmones%20ri%C3%B1ones%20y%20ojos).

OSINERGMIN. (2007). Panorama de la Minería en el Perú. (Documento informativo). Recuperado de: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Libro_Panorama_de_la_Mineria_en_el_Peru.pdf

Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente (PNUMA). (2019). Guía para el manejo y almacenamiento de mercurio. (Guía Técnica, Medellín, Colombia). Recuperado de: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/33418/Guia_hg.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2017). Elaboración de un plan de acción nacional para reducir y, cuando sea posible, eliminar el uso de

mercurio en la extracción de oro artesanal y en pequeña escala. Documento de orientación. Recuperado de:

https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25473/NAP_guidance2018_SP.pdf?sequence=6&isAllowed=y

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2018). Evaluación mundial de mercurio 2018 - principales conclusiones. Cuarto informe técnico: Principales conclusiones pertinentes para las políticas. Recuperado de: https://www.informea.org/sites/default/files/imported-documents/GMAKF_SP.pdf

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2017). Global mercury, supply, trade and demand. (United Nations Environment Programme, Chemicals and Health Branch. Geneva, Switzerland). Recuperado de: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/21725/global_mercury.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). El Convenio de Minamata sobre el mercurio y su implementación en la región de América Latina y El Caribe. (Informe técnico de libre acceso). Recuperado de: https://www.mercuryconvention.org/sites/default/files/inline-files/folleto_Minamata_LAC_ES_FINAL.pdf

Ratto, C. (1969). Selección de materiales óptimos para forros de molinos en acero y fierro para la industria minera. (Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú). Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/417537704/Materiales-Para-Forros-de-Molinos-en-Acero-y-Fierro>

Reyes, J. & González, V. (2016). Diseño y construcción de un molino de bolas para la pulverización de arcillas en el laboratorio de materiales y catálisis de la Universidad de Córdoba. (Proyecto de grado para obtener el título de Ingeniero Mecánico, Universidad de Córdoba, Montería-Colombia). Recuperado de: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/672/TRABAJO%20ODE%20GRADO%20FINAL%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rinse J., (1927), The vapor pressure, dissociation and transition point of mercury sulphide: *Recueil Des Travaux Chimiques Des Pays-Bas.*, 47(1), p. 28-32. Doi: <https://doi.org/10.1002/recl.19280470105>

- Salas, J. & Benavidez, W. (2015). Tratamiento del mercurio de fluorescentes y bombillas del alumbrado público. *Evaluación Preliminar. Tecnología en marcha*. Vol. 28, N°4. Pág 78-85. Recuperado de: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n4/0379-3982-tem-28-04-00078.pdf>
- Salas, J. (2017). Control y evaluación de parámetros en la operación de la planta Merrill Crowe en la U.E.A. Valeria de la minera Anabi S.A.C. (Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Metalurgista, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú). Recuperado de: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2439/Imsazejo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Selin, N. (2009). Global biogeochemical cycling of mercury: a review. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, pp. 43-63 (<https://doi.org/10.1146/annurev.environ.051308.084314>).
- Sharma, R., Chang, Y.J.L. & Guminski, C. (1993). The Hg-S (Mercury-sulfur) system. *Journal of Phase Equilibria*. Vol. 14, N°1, 100-109. <https://doi.org/10.1007/BF02652168>
- Sistema Integral de información toxicológica de la US EPA, OMS y ATSDR. (S.f.). Perfil toxicológico de Mercurio (Hg), Número CAS 7439-97-6. (Información técnica normativa). Recuperado de: <https://studylib.es/doc/5469476/perfil-toxicol%C3%B3gico-de-mercurio--hg---n%C3%BAmero-cas-7439-97-6>
- Sun, R.; Yu, M.; Luo, G.; Li, X.; Tian, H; & Yao, H. (2020). Theoretical research on reaction of solid sulfur allotropes with elemental mercury, *Chemical Engineering Journal*, 127113. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127113>
- Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT). (2018). Memoria Anual 2017. (Información para la cuenta general de la República, Lima, Perú). <https://www.sunat.gob.pe/cuentassunat/planestrategico/memoria/memoria2017.pdf>
- Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT). (2015). Normas y Acciones de Control de IQBF: Minería Ilegal – Mercurio. (Documento informativo). Recuperado de: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/13064/SUNAT_Summary_of_mercury_trade_in_Peru.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Takacs, L. (2002) Self-sustaining reactions induced by ball milling, *Progress in Materials Science*, 47(4). 355-414. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(01\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(01)00002-0).
- U.S. department of health and human services. (1999). Toxicological profile for mercury. (Información técnica normativa). Recuperado de: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp46.pdf>
- U.S. Geological Survey. (2020). Mineral Commodity Summaries (MCS). United States Geological Survey 2008 – 2018. 200 p. Doi: <https://doi.org/10.3133/mcs2020>
- Von Glasow, R.; & Crutzen, P. (2014). The Atmosphere. *Treatise on Geochemistry* (Second Edition). Vol. 4, pp. 1-67. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00402-2>
- Weg. (2017). Motor trifásico W22. (Catálogo comercial del mercado Latinoamericano). Recuperado de: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h60/h24/WEG-w22-motor-trifasico-50044029-brochure-spanish-web.pdf>
- World Integrated Trade Solution. (2019). Mercury imports by country until 2019. (Base de datos online). Recuperado de: <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2019/tradeflow/Imports/partner/WLD/product/280540>

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Potencial de producción de mercurio en el país

Utilizando la data brindada por el USGS en sus publicaciones estadísticas anuales de mercurio de los últimos 10 años (2010-2020), se estimó el potencial de producción de mercurio en el país para los próximos 10 años (2020 al 2030).

Para ello, se utilizó el método de mínimos cuadrados definido por las ecuaciones A, B y C.

A)
$$Y = a_0 + a_1X$$

B)
$$a_0 = \frac{\Sigma y \cdot \Sigma x^2 - \Sigma x \cdot \Sigma xy}{n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}$$

C)
$$a_1 = \frac{n \cdot \Sigma xy - \Sigma x \cdot \Sigma y}{n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}$$

Donde:

a_0 : es el valor de la recta que intercepta al eje Y

a_1 : es el valor de la pendiente de la recta

Y: es la variable dependiente, producción de mercurio

X: es la variable independiente, el año de evaluación

Los datos recopilados de la USGS se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 37: Potencial Anual de Producción de mercurio según la USGS

Años	Potencial de Producción de mercurio
2011	35
2012	40
2013	45
2014	40
2015	35
2016	40
2017	40
2018	40
2019	40

FUENTE: USGS (2011-2019)

Una vez identificados los datos a utilizar, se procedió a desarrollar la tabla de valores necesarios para el desarrollo de las ecuaciones A, B y C.

Tabla 38: Valores para el desarrollo de la ecuación de regresión - USGS

Años	x	y	xy	x²	y²
2011	1	35	35	1	1225
2012	2	40	80	4	1600
2013	3	45	135	9	2025
2014	4	40	160	16	1600
2015	5	35	175	25	1225
2016	6	40	240	36	1600
2017	7	40	280	49	1600
2018	8	40	320	64	1600
2019	9	40	360	81	1600

FUENTE: Elaboración propia; USGS (2011-2019)

Con esta tabla se procedió a desarrollar las ecuaciones B y C, obteniéndose los siguientes valores

$$a_0 = 38.61$$

$$a_1 = 0.1667$$

Con los valores de la recta identificados, se procedió a formular la ecuación de regresión, tal y como se muestra a continuación:

$$y = 38.61 + 0.1667x$$

Con la ecuación identificada, se proyectaron los valores del potencial de producción de mercurio para los próximos 10 años (Ver Tabla 39)

Tabla 39: Proyección del potencial de producción de Mercurio para el 2019-2030

Año	Toneladas de Mercurio	Año	Toneladas de Mercurio
2011	35	2021	40
2012	40	2022	41
2013	45	2023	41
2014	40	2024	41
2015	35	2025	41
2016	40	2026	41
2017	40	2027	41
2018	40	2028	42
2019	40	2029	42
2020	40	2030	42

FUENTE: Elaboración propia; USGS (2011-2019)

Anexo 2: Cantidad de mercurio residual generado por la Gran Minería

La proyección de mercurio residual producto de la gran minería fue calculada a partir de los datos de crecimiento de la producción de oro, ya que se estima que la gran minería produce una cantidad de mercurio equivalente a la cantidad de oro fino producido. Es decir, la proporción de producción oro y mercurio es de 1:1. (Arana, 2009)

Primero se recopiló la data de producción de oro en el Perú de los últimos 10 años de las estadísticas anuales del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 40: Producción anual de oro en gramos finos refinados según el MINEM

Años	Producción anual de oro (g. rf)
2011	166,186,716.98
2012	161,544,666.15
2013	151,486,071.69
2014	140,097,028.09
2015	146,822,906.54
2016	153,005,896.98
2017	151,964,039.96
2018	140,210,984.42
2019	128,413,463.36

FUENTE: MINEM (2011-2019)

Luego, se armó la tabla de valores requeridos para el cálculo de la ecuación de regresión (Ver **Tabla 41**), la cual se encuentra definida por las siguientes ecuaciones A, B y C

A)
$$Y = a_0 + a_1X$$

B)
$$a_0 = \frac{\Sigma y \cdot \Sigma x^2 - \Sigma x \cdot \Sigma xy}{n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}$$

$$a_1 = \frac{n \cdot \Sigma xy - \Sigma x \cdot \Sigma y}{n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}$$

C)

Donde:

a_0 : es el valor de la recta que intercepta al eje Y

a_1 : es el valor de la pendiente de la recta

Y: es la variable dependiente, producción de oro

X: es la variable independiente, el año de evaluación

Tabla 41: Valores para el desarrollo de la ecuación de regresión - MINEM

Años	x	y	xy	x ²	y ²
2011	1	166,186,716.98	166186717	1	2.7618E+16
2012	2	161,544,666.15	323089332	4	2.6097E+16
2013	3	151,486,071.69	454458215	9	2.2948E+16
2014	4	140,097,028.09	560388112	16	1.9627E+16
2015	5	146,822,906.54	734114533	25	2.1557E+16
2016	6	153,005,896.98	918035382	36	2.3411E+16
2017	7	151,964,039.96	1063748280	49	2.3093E+16
2018	8	140,210,984.42	1121687875	64	1.9659E+16
2019	9	128,413,463.36	1155721170	81	1.649E+16

FUENTE: Elaboración propia; MINEM (2011-2019)

Con esta tabla se procedió a desarrollar las ecuaciones B y C, obteniéndose los siguientes valores

$$a_0 = 165628190.54$$

$$a_1 = -3353820.9049$$

Con los valores de la recta identificados, se procedió a formular la ecuación de regresión, tal y como se muestra a continuación:

$$y = 165628190.54 \pm 3353820.9049x$$

Con la ecuación identificada, se proyectaron los valores del potencial de producción de mercurio para los próximos 10 años (Ver Tabla 42)

Tabla 42: Proyección de la producción de Oro para el 2019-2030

Año	Grs.f de Oro	Año	Grs.f de Oro
2011	166,186,716.98	2021	128,736,160.59
2012	161,544,666.15	2022	125,382,339.68
2013	151,486,071.69	2023	122,028,518.78
2014	140,097,028.09	2024	118,674,697.87
2015	146,822,906.54	2025	115,320,876.97
2016	153,005,896.98	2026	111,967,056.06
2017	151,964,039.96	2027	108,613,235.16
2018	140,210,984.42	2028	105,259,414.25
2019	128,413,463.36	2029	101,905,593.35
2020	132,089,981.49	2030	98,551,772.44

FUENTE: Elaboración propia; MINEM (2011-2019)

Una vez estimada la producción de oro al 2030, se calculó la cantidad de mercurio residual producto de la gran minería a partir de una proporcionalidad de crecimiento 1:1, tal y como se muestra en la Figura 27.

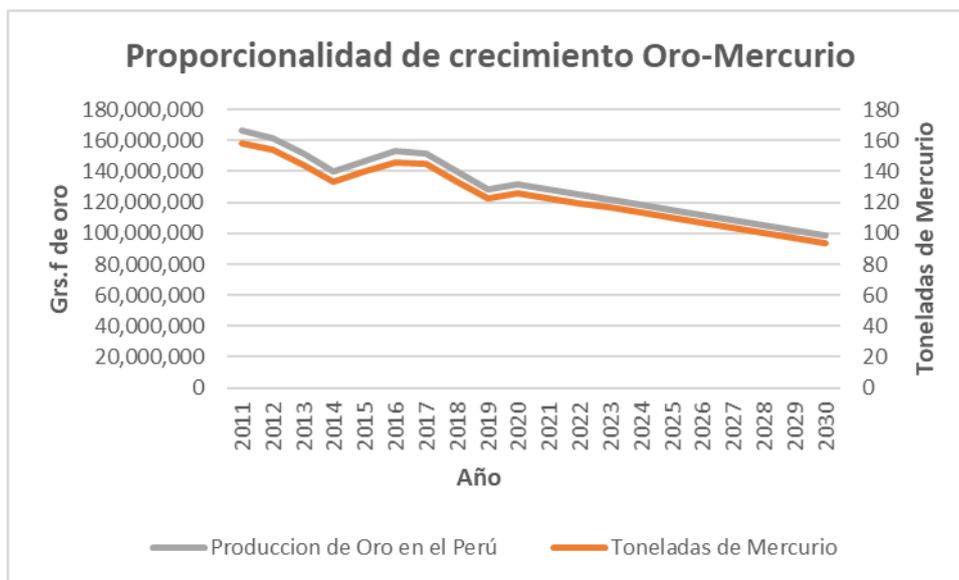


Figura 27: Proporcionalidad de crecimiento del oro y el mercurio
FUENTE: Elaboración propia; MINEM (2011-2019)

Finalmente, se identificó la cantidad de mercurio residual generado por la gran minería en la Tabla 43.

Tabla 43: Proyección de la cantidad de mercurio residual generado por la gran minería

Año	Toneladas de mercurio	Año	Toneladas de mercurio
2011	166.19	2021	128.74
2012	161.54	2022	125.38
2013	151.49	2023	122.03
2014	140.10	2024	118.67
2015	146.82	2025	115.32
2016	153.01	2026	111.97
2017	151.96	2027	108.61
2018	140.21	2028	105.26
2019	128.41	2029	101.91
2020	132.09	2030	98.55

FUENTE: Elaboración propia; MINEM (2011-2019)

Anexo 3: Cantidad de mercurio que ingresa al Perú por contrabando

Se estimó que para el año 2017, la cantidad aproximada de mercurio que ingresó por contrabando al país fue de 137.5 toneladas. Utilizando este dato, la data de producción de oro evaluada en el ANEXO 2 y el método de mínimos cuadrados, se calculó proporcionalmente la cantidad de mercurio por contrabando que ingresó al país entre los años 2011-2020 y también se proyectó su valor hasta el 2030. Esto debido a que el crecimiento del oro influye en el aumento o disminución de la utilización de mercurio en la minería. (Ver Tabla 44)

La ecuación de regresión del crecimiento de mercurio por contrabando la siguiente:

$$Y = +152.33 - 3.0766x$$

Con esta ecuación se procedió con estimar las cantidades de mercurio entre los años 2011-2030.

Tabla 44: Proyección de la cantidad de mercurio que ingresa al país por contrabando

Año	Toneladas de mercurio	Año	Toneladas de mercurio
2011	153.10	2021	118.60
2012	148.83	2022	115.51
2013	139.56	2023	112.42
2014	129.07	2024	109.33
2015	135.26	2025	106.24
2016	140.96	2026	103.15
2017	137.50	2027	100.06
2018	129.17	2028	96.97
2019	118.30	2029	93.88
2020	121.69	2030	90.79

FUENTE: Elaboración propia; MINEM (2011-2019)

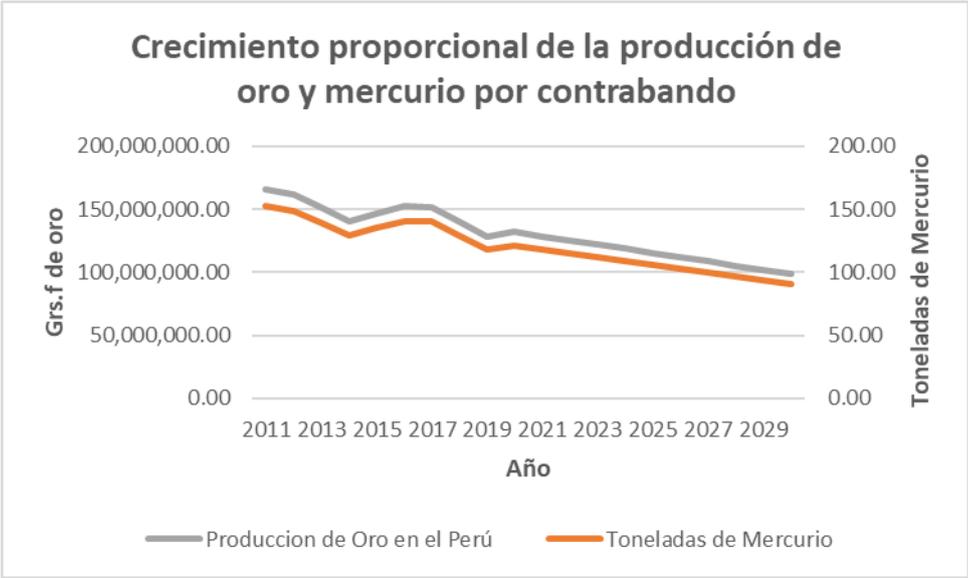


Figura 28: Proporcionalidad de crecimiento del oro y el mercurio de contrabando
FUENTE: Elaboración propia; MINEM (2011-2019)

Anexo 4: Informe de Ensayo TCLP - SGS

	LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002									
INFORME DE ENSAYO MA2113642 Rev. 0										
TOWER AND TOWER S.A.										
CAL.MANUEL AUGUSTO GONZALES OLAECHEA NRO. 462 URB. LIMATAMBO LIMA - LIMA - SAN ISIDRO										
ENV / LB-348134-002										
PROCEDENCIA : PIEC1-6-P-215-054-20										
Fecha de Recepción SGS :	11-05-2021									
Fecha de Ejecución :	Del 11-05-2021 al 12-06-2021									
Muestreo Realizado Por :	CLIENTE									
<table border="1"><thead><tr><th>Estación de Muestreo</th></tr></thead><tbody><tr><td>SM01-03M1</td></tr><tr><td>SM01-04M2</td></tr><tr><td>SM01-04M3</td></tr><tr><td>SM02-05M1</td></tr><tr><td>SM02-05M2</td></tr><tr><td>SM03-06M1</td></tr><tr><td>SM03-06M2</td></tr></tbody></table>			Estación de Muestreo	SM01-03M1	SM01-04M2	SM01-04M3	SM02-05M1	SM02-05M2	SM03-06M1	SM03-06M2
Estación de Muestreo										
SM01-03M1										
SM01-04M2										
SM01-04M3										
SM02-05M1										
SM02-05M2										
SM03-06M1										
SM03-06M2										
Emitido por SGS del Perú S.A.C.										
Impreso el 05/07/2021										
										
Frank M. Julcamoro Quispe C.Q.P. 1033 Coordinador de Laboratorio										
<small>"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"</small>										
<small>Página 1 de 6</small>										



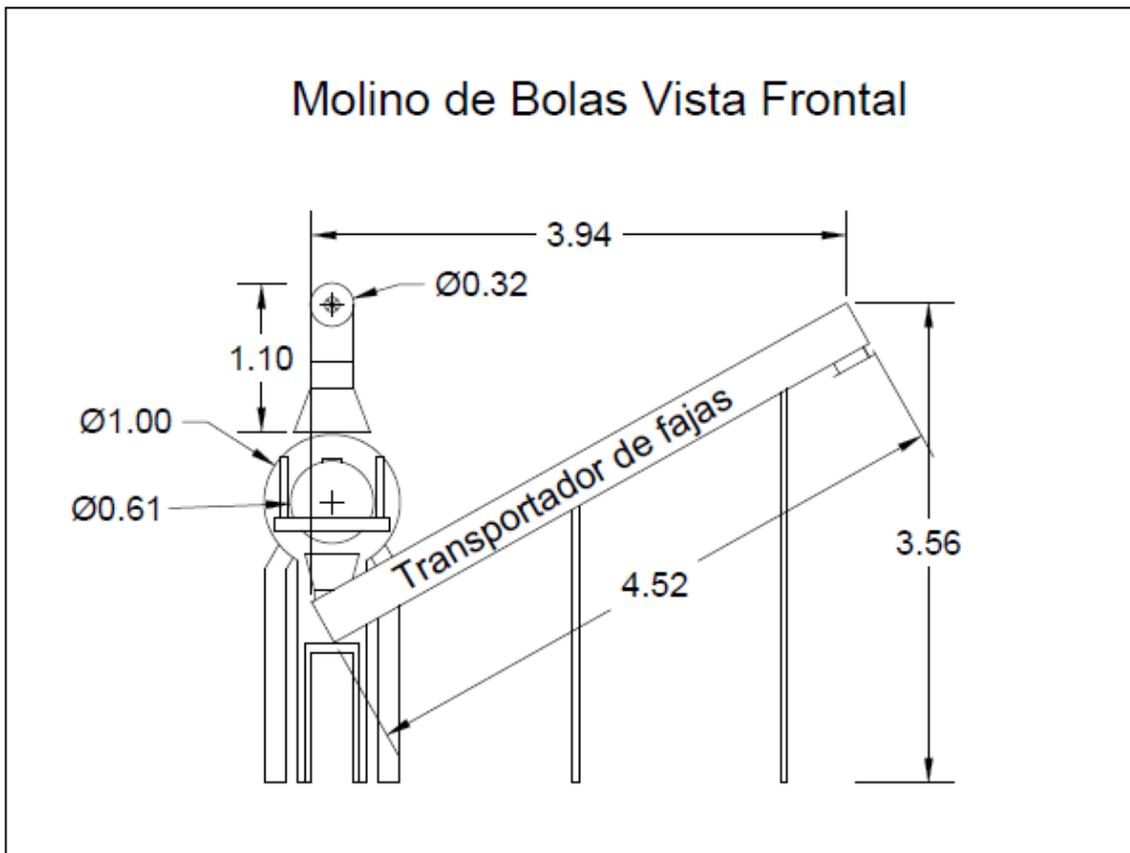
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



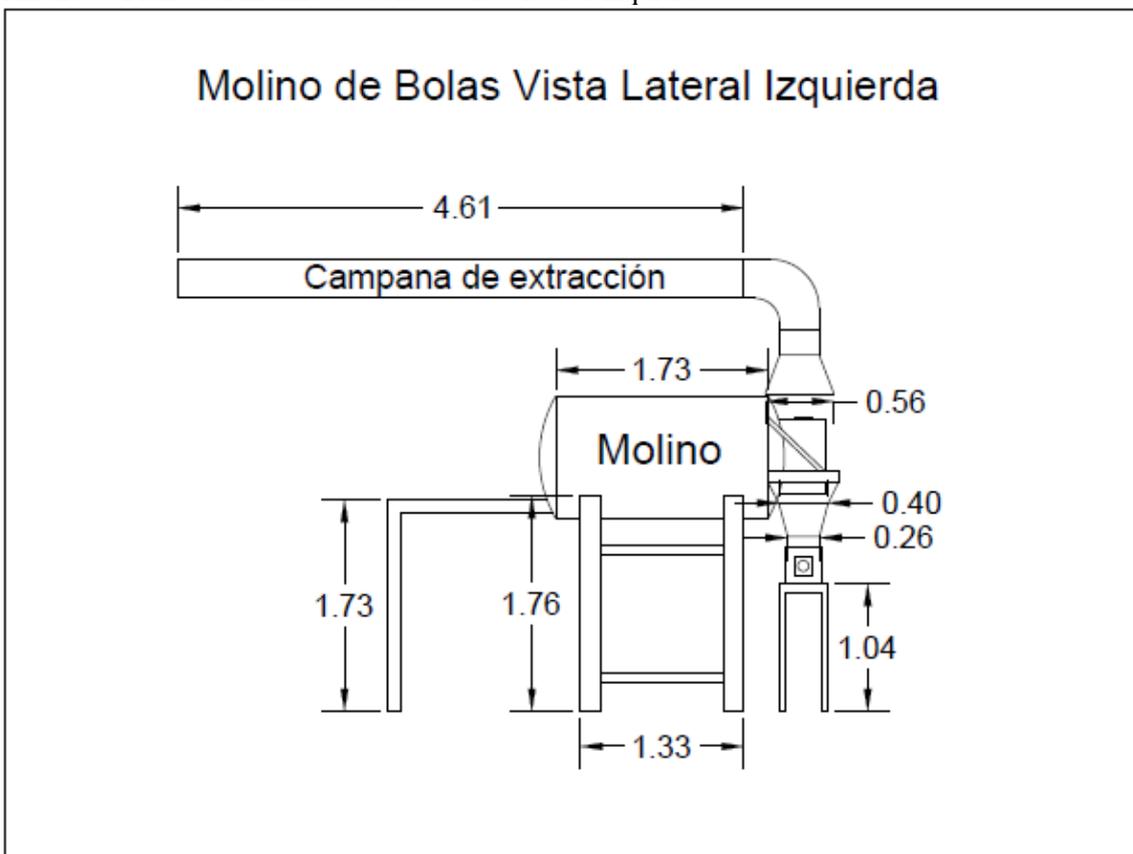
**INFORME DE ENSAYO
MA2113642 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					SM01-03M1	SM01-04M2	SM01-04M3
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					08/05/2021	08/05/2021	08/05/2021
HORA DE MUESTREO					00:00:00	00:00:00	00:00:00
MATRIZ					RESIDUOS LIQUIDOS RESIDUO LIQUIDO	RESIDUOS LIQUIDOS RESIDUO LIQUIDO	RESIDUOS LIQUIDOS RESIDUO LIQUIDO
PRODUCTO DESCRITO COMO							
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales en TCLP							
Aluminio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.002	0.005	0.517	0.165	0.132
Antimonio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.002	0.003	<0.002	<0.002
Arsénico	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.002	0.006	<0.006	<0.006	<0.006
Bario	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.005	0.032	0.020	0.020
Berilio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Bismuto	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.002	0.006	<0.006	<0.006	<0.006
Boro	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.003	0.010	0.102	0.092	0.086
Cadmio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.004	<0.004	<0.004	<0.004
Calcio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.041	0.131	7.644	2.533	3.379
Cobalto	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.002	0.023	0.008	0.006
Cobre	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.002	0.006	0.011	0.015	<0.006
Cromo	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.004	0.055	0.022	0.012
Estaño	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Estroncio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.004	0.020	0.009	0.009
Fósforo	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.04	0.11	<0.11	<0.11	<0.11
Hierro	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.02	0.05	0.76	0.54	0.49
Magnesio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.003	0.009	1.272	0.452	0.379
Manganeso	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.003	0.499	0.141	0.085
Mercurio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.003	0.099	1.633	0.082
Molibdeno	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.0004	0.0012	<0.0012	<0.0012	<0.0012
Níquel	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.002	0.005	0.794	0.294	0.216
Plata	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Plomo	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.002	0.005	0.010	0.005	0.011
Potasio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.018	0.057	1.239	0.608	0.647
Selenio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.004	<0.004	<0.004	<0.004
Talio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Titanio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.004	0.014	<0.014	<0.014	<0.014
Vanadio	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.005	0.016	<0.016	<0.016	<0.016
Zinc	ELEA_EPA1311_6020	mg/L	0.002	0.006	0.133	0.269	0.234

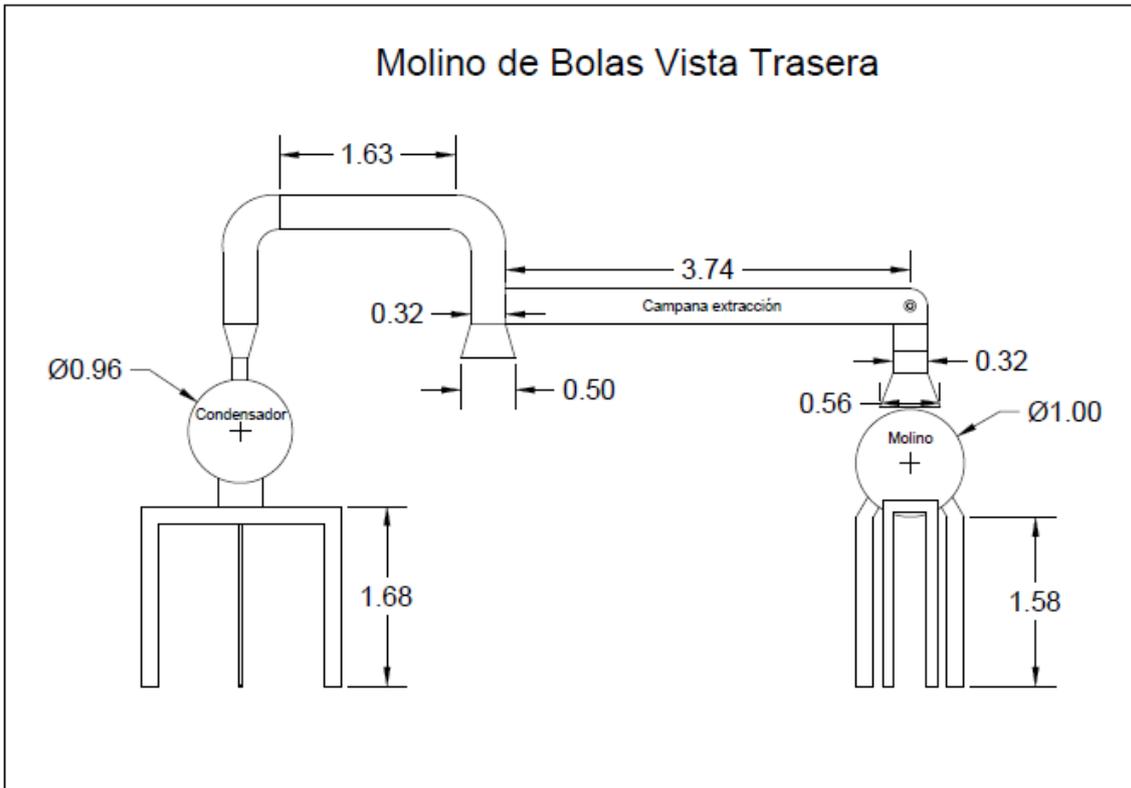
Anexo 5: Plano del molino de bolas – vista frontal



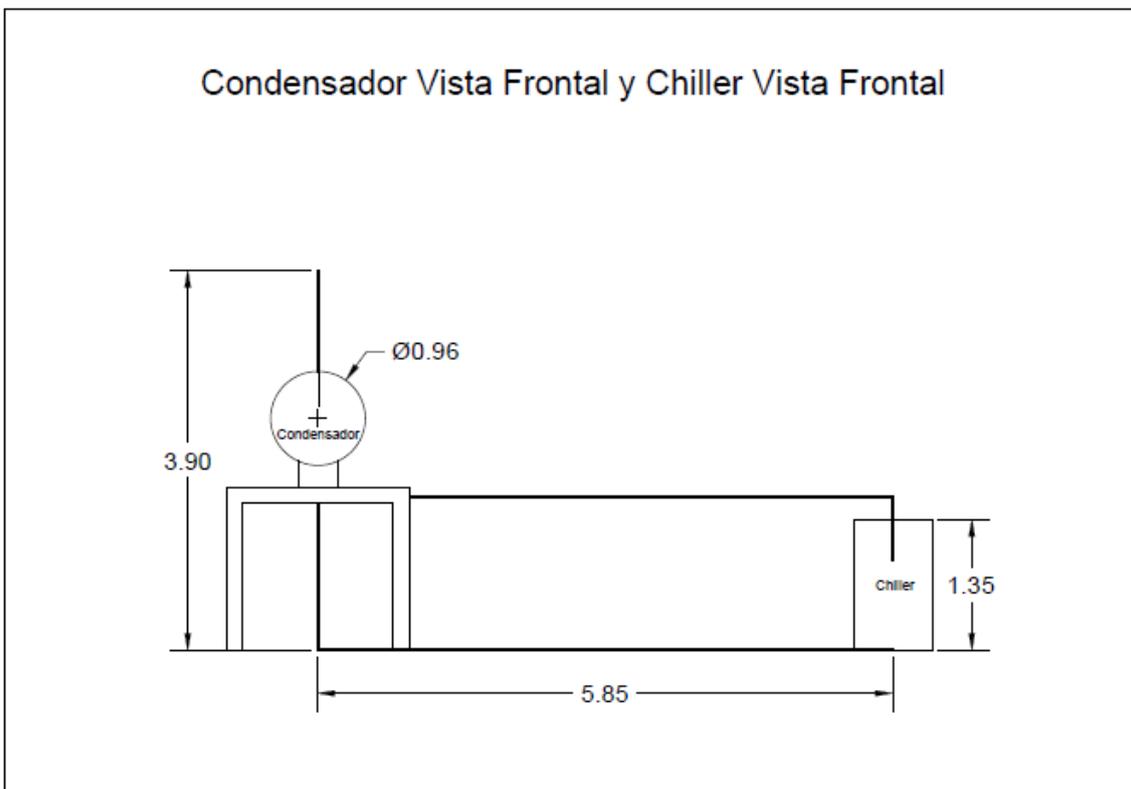
Anexo 6: Plano del molino de bolas – vista lateral izquierda



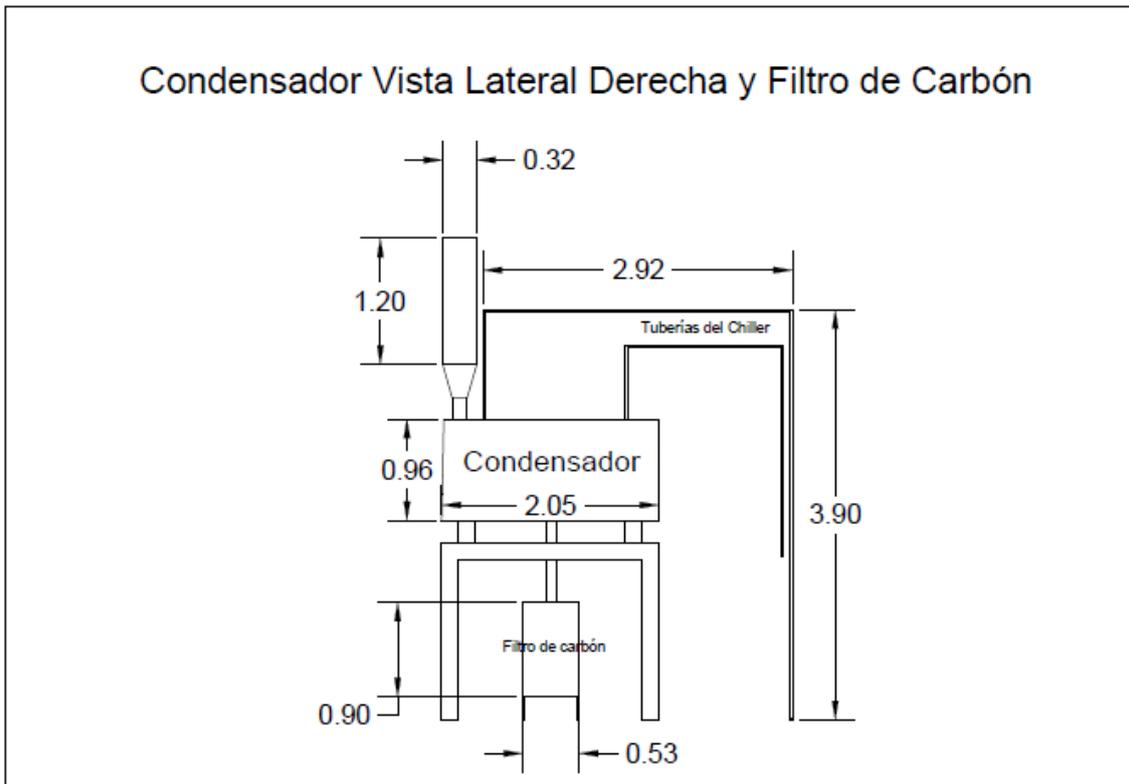
Anexo 7: Plan del molino de bolas – vista posterior



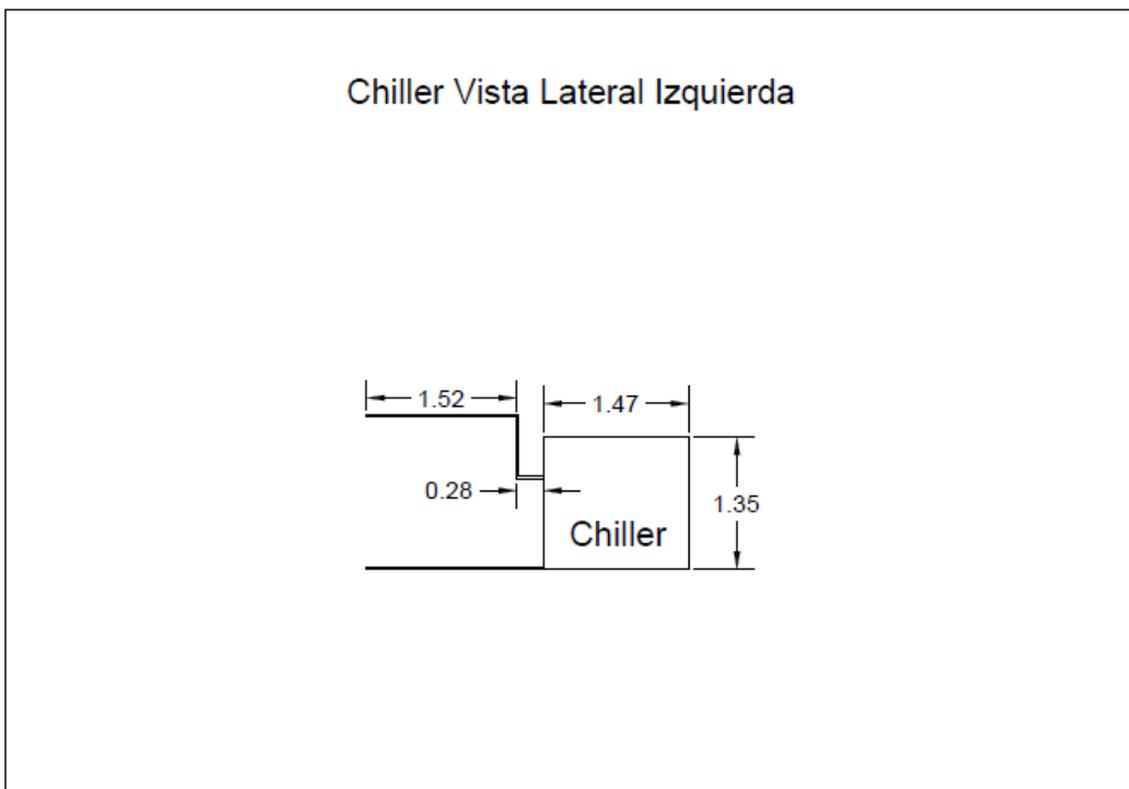
Anexo 8: Plano del condensador y chiller – vista frontal



Anexo 9: Planos del condensador y el filtro de carbón – vista lateral derecha



Anexo 10: Plano del chiller – vista lateral izquierda



Anexo 11: Tambor del molino – estructura externa



Anexo 12: Tambor del molino – estructura interna



Anexo 13: Tambor y carcasa del molino



Anexo 14: Estructura de conexión entre el tambor del molino y el motor



Anexo 15: Compuerta de alimentación y descarga



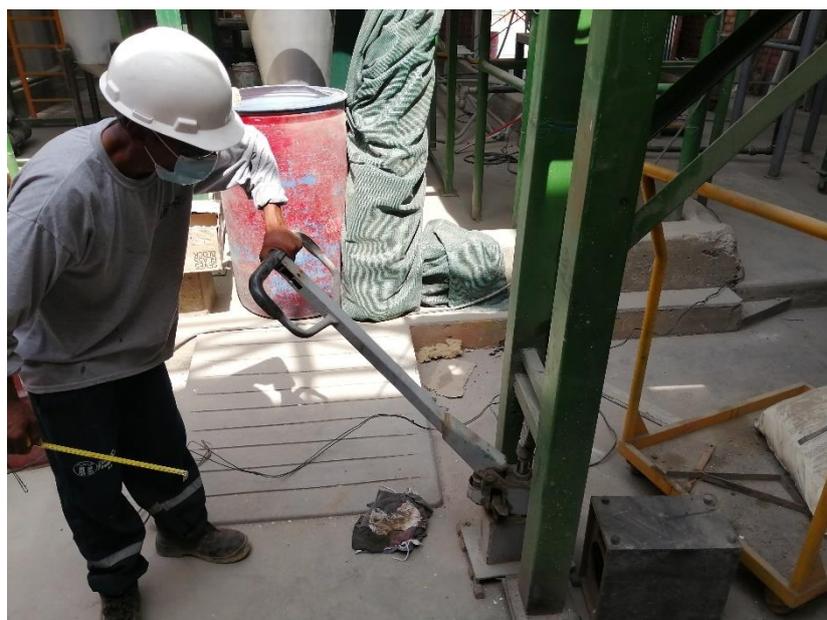
Anexo 16: Motor del Molino



Anexo 17: Estructura de soporte del molino de bolas



Anexo 18: Sistema mecánico de elevación tipo “Gata”



Anexo 19: Campana de Extracción



Anexo 20: Condensador de gases



Anexo 21: Filtro de carbón activado



Anexo 22: Chiller



Anexo 23: Tuberías de conexión entre la campana y el condensador



Anexo 24: Equipos de protección personal (EPPs)

Tabla 45: Traje de PVC de cuerpo completo desechables

	
<p>*Imagen referencial</p>	
Marca:	KLEENGUARD A70
Descripción:	Trajes de Protección contra químicos KLEENGUARD A70
Composición:	53.3% Polipropileno – 46.7% Polietileno
Ficha técnica:	https://www.kcprofessional.com.co/media/9895447/kleenguard-traje-a70.pdf

Tabla 46: Máscara respiradora de Cara Completa Reutilizable 3M-6000

	
<i>*Imagen referencial</i>	
Marca:	3M™
Descripción:	Máscara respiradora de Cara Completa Reutilizable 3M™ Serie 6000
Composición:	Silicona, Elastómero Termoplástico (TPE)
Ficha técnica:	https://www.3m.com.pe/3M/es_PE/p/d/b00039038/

Tabla 47: Cartucho para vapores de mercurio



*Imagen referencial

Marca:	3M™
Descripción:	Cartucho para vapor de mercurio/Cloro/Dióxido de Azufre 3M™ Serie 6009S
Tipo de soporte:	Conexión de tipo Bayoneta
Ficha técnica:	https://www.3m.com.pe/3M/es_PE/p/d/b00039038/

Tabla 48: Botas de seguridad para trabajos químicos

 <p>*Imagen referencial</p>	
Marca:	SEGURINDUSTRIA #02020004
Descripción:	Botas de seguridad impermeable, resistente a ácidos y/o hidrocarburos, íntegramente reforzada, resistente a grasas y aceites.
Material:	PVC-Nitrilo
Ficha técnica:	https://segurindustria.pe/productos/calzado-de-seguridad/botas-de-pvc/item/17-quimica.html

Tabla 49: Casco de seguridad

 <p style="text-align: right;">*Imagen referencial</p>	
Marca:	3M™ H700
Descripción:	Casco de seguridad con arnés de ruleta, banda para el sudor de plástico y buen ángulo de visión.
Material:	Polietileno de alta densidad
Ficha técnica:	https://www.3m.com.pe/3M/es_PE/p/d/v100602360/

Tabla 50: Orejeras para montaje en casco de seguridad

	
*Imagen referencial	
Marca:	3M PELTOR H9P3E
Descripción:	Orejera para montaje en casco de seguridad con protección para trabajos con niveles de ruido superiores a los 98 dB por jornada de trabajo.
Material:	ABS con almohadillas rellenas de líquido y espuma
Ficha técnica:	https://static.soltrak.com.pe/fcsaprdsoltrak01/2020/05/ficha-tecnica_orejera-para-casco-H9P3E.pdf

Tabla 51: Protectores auditivos

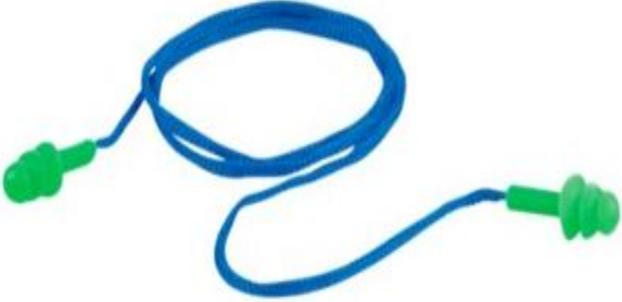
 <p style="text-align: right;">*Imagen referencial</p>	
Marca:	Protectores Auditivos - Sodimac
Descripción:	Protectores auditivos con acople para todo tipo de orejas, sea cual fuere su tamaño para trabajos expuestos a ruidos fuertes.
Material:	Nylon y Plástico
Ficha técnica:	https://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/product/1085069/protectores-auditivos-nylon/1085069/?queryId=72c7c154-a5f1-46ae-98b5-ca8a658c4489

Tabla 52: Guantes Químicos de nitrilo

	
*Imagen referencial	
Marca:	Jackson Safety
Descripción:	Guantes Químicos G80 Nitrilo 13”
Material:	Nitrilo 100%
Ficha técnica:	https://www.kcprofessional.cr/media/7020131/Ficha-Tecnica-G80-Nitrilo-13.pdf