

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN EL PROCESO DE ABASTECIMIENTO A
UN MOLINO DE MARTILLOS EN LA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE
MINERALES MUKI KUTANA S.A.C. – LA LIBERTAD**

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

Presentado por:

Bach. Centurión Camacho Giancarlo Ramón

Asesor:

M. Cs. Arapa Vilca Víctor Ausberto

Cajamarca-Perú

2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

- Investigador** : CENTURIÓN CAMACHO GIANCARLO RAMÓN
DNI : 71820357
Escuela Profesional : INGENIERÍA DE MINAS
- Asesor** : M. CS. ING. ARAPA VILCA VICTOR AUSBERTO
Facultad : INGENIERÍA
- Grado académico o título profesional**
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
- Tipo de Investigación:**
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
- Título de Trabajo de Investigación:**
EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN EL PROCESO DE ABASTECIMIENTO A UN MOLINO DE
MARTILLOS EN LA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES MUKI KUTANA S.A.C. – LA
LIBERTAD
- Fecha de evaluación:** 14 DE ENERO DE 2025
- Software antiplagio:** TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
- Porcentaje de Informe de Similitud:** 9%
- Código Documento:** trn:oid:::3117:420954155
- Resultado de la Evaluación de Similitud:**
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 23 DE ENERO DEL 2025



FIRMA DEL ASESOR
M. CS. ING. ARAPA VILCA VICTOR AUSBERTO
DNI: 29552145



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258601 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 23/01/2025 13:46:47-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : "EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN EL PROCESO DE ABASTECIMIENTO A UN MOLINO DE MARTILLOS EN LA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES MUKI KUTANA S.A.C. – LA LIBERTAD"

ASESOR : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0142-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 22 de abril de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **veinticuatro días del mes de abril de 2025**, siendo las diez horas (10:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J – 210), se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

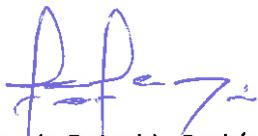
Presidente : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Vocal : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Secretario : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada "EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN EL PROCESO DE ABASTECIMIENTO A UN MOLINO DE MARTILLOS EN LA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES MUKI KUTANA S.A.C. – LA LIBERTAD" presentado por el Bachiller en Ingeniería de Minas GIANCARLO RAMÓN CENTURIÓN CAMACHO, asesorado por el M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 03.00 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11.00 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 14.00 PTS. **CATORCE** (En letras)

En consecuencia, se lo declara **APROBADO** con el calificativo de **CATORCE** acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las **11.00 am** horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.


Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente


Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal


M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Secretario


M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Asesor

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios, por guiarme y poder terminar mis estudios con el apoyo de mis padres.

A mi alma mater, la Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas por haberme brindado una formación ética y científica, y en especial a mi asesor Ing. Arapa Vilca Victor Ausberto por su experiencia y apoyo incondicional en esta presente investigación.

A la empresa Muki Kutana S.A.C. por haber permitido la realización de este estudio y a todos los que contribuyeron a su desarrollo.

Giancarlo Centurión

DEDICATORIA

Esta investigación va dedicada a mis padres Octavio y Elena, por su apoyo y sacrificio en su afán de prepararme para la vida.

A mis hermanos Joseph, Nezaret, Emily, Jesús que son una motivación constante para mejorar profesionalmente y a mis abuelos María y Francisco y demás familiares, quienes me cuidaron e inculcaron valores desde pequeño.

A mi madrina Deycy por su apoyo en todo momento.

A mi querida Hillary por haberme apoyado y en enseñarme muchas cosas durante la universidad.

Giancarlo Centurión

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE GRÁFICAS	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
2.1.1 Antecedentes Internacionales	3
2.1.2 Antecedentes Nacionales	3
2.2 BASES TEÓRICAS.....	5
2.2.1 Teoría de mejora de procesos	5
2.2.2 Método para definir procesos	7
2.2.3 Método para analizar procesos	9
2.2.4 Principios mecánicos utilizados para reducción de tamaño	9
2.2.5 Molinos utilizados en la Industria de conmiución de minerales	11
2.2.6 Simulación de procesos	18

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.1 UBICACIÓN.....	20
----------------------	----

	Pág.
3.1.2 Accesibilidad	22
3.2 Tipo, nivel, diseño y método de la investigación	24
3.2.1 Población de estudio	24
3.2.2 Muestra	24
3.2.3 Unidad de análisis.....	24
3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	24
3.3.1 Técnicas	24
3.3.2 Instrumentos de recolección de datos	25
3.3.3 Softwares	25
3.4 PROCEDIMIENTO	25
3.4.1 Relación entre Minortex S.A.C. y Muki Kutana S.A.C	25
3.4.2 Geología local.....	26
3.4.3 Mineral a procesar	26
3.4.4 Mineralogía.....	27
3.4.5 Distribución de instalaciones en la planta	33
3.4.6 Descripción de molino de martillos.....	36
3.4.7 Análisis y diagnóstico del proceso de conmiución de minerales	37
3.4.8 Análisis del proceso de molienda	38
3.4.9 Análisis de distancia entre martillos y placa del molino en la zona de trituración de minerales.....	45
3.4.10 Diseño inicial de pieza de abastecimiento.....	47
3.4.11. Vista de acoplamiento con el molino de martillos.....	48
3.4.12 Configuración de propiedades físicas de la pieza de abastecimiento con el diseño inicial a través del software Inventor de Autodesk.....	49
3.4.13 Simulación de Abastecimiento con el diseño inicial a través del software Inventor de Autodesk.....	50
3.4.14 Problemas relacionados al funcionamiento del diseño inicial.....	52

	Pág.
3.4.15 Variación de masa en los martillos por deterioro obtenido de moliendas realizadas con el diseño inicial.....	54

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Propuesta de diseño de abastecimiento	57
4.2 Simulación de acoplamiento con el molino y la faja de transporte.....	59
4.3 Simulación de Abastecimiento con el diseño propuesto	60
4.4 Presupuesto para construcción del diseño propuesto	63
4.5 Construcción del diseño propuesto.....	63
4.6 Forma de martillos utilizados con el diseño propuesto.	64
4.7 Variación de masa en los martillos por deterioro el diseño propuesto	65
4.8 Análisis de la variación de masa por cada juego de martillos.	67
4.9 Análisis del costo de la fabricación de martillos.	68
4.10 Análisis de la cantidad de mineral procesado.....	69
4.11 Análisis de paradas de planta.....	70
4.12 Análisis de granulometría del resultado	70
4.13 Contrastación de la Hipótesis	70

CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones	72
5.2 Recomendaciones.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
ANEXOS	76

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Formato de registro SIPOC	9
Tabla 2: Coordenadas del punto de acceso a la planta Muki Kutana S.A.C.	20
Tabla 3: Accesibilidad a la planta Muki Kutana S.A.C.	22
Tabla 4 : Delimitación de zona dentro de la concesión AURUM NORTH 2	26
Tabla 5: Coordenadas de Bocamina	26
Tabla 6: Mineralogía a procesar	28
Table 7: Propiedades físicas de los minerales a procesar.	31
Tabla 8: Diagrama SIPOC aplicado al proceso de conminución de minerales de la empresa Muki Kutana S.A.C	37
Tabla 9: Problemas identificados durante el proceso de conminución de minerales	39
Tabla 10 Simbología para diagramas de flujo.	41
Tabla 11: Medición de masa de los martillos antes y después del proceso de conminución de minerales con el diseño inicial.	54
Tabla 12 : Presupuesto para la construcción del diseño propuesto.....	63
Tabla 13: Medición de masa de los martillos antes y después del proceso de conminución de minerales con el diseño propuesto.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Diagrama de ISHIKAWA (Rivera, 2016).....	9
Figura 3: Molino de Discos Normal (Luna, 2019)	12
Figura 4: Molino de Discos Vibratorios (Luna, 2019)	13
Figura 5: Molino de Bolas (Luna, 2019)	14
Figura 6: Molino de barras. (MAGOTTEAUX, 2024)	15
Figura 7: Molino autógeno (Luoyang Zhongtai Industries Co., Ltd., 2015).....	16
Figura 8: Molino Semi Autógeno (SAG). (Blanco, 2018)	17
Figura 9: Molino de martillos.....	18
Figura 10: Ubicación de la empresa Muki Kutana S.A.C.	21
Figura 11: Ruta de acceso a la planta Muki Kutana S.A.C. (Google Maps 2024)	23
Figura 12: Guía de Remisión de la empresa Minortex S.A.C	27
Figura 13: Mineralogía a procesar (Calcantita).....	29
Figura 14: Mineralogía a procesar (Esfalerita, Galena y Argentita).....	29
Figure 16: Mineralogía a procesar (Pirita, Calcopirita).....	30
Figura 15: Mineralogía a procesar (Galena y Cuarzo).	30
Figura 17: Vista interior de distancia entre martillos y placa de molino en la zona de trituración.	45
Figura 18: Ingreso de valor para la fuerza centrífuga en la interfaz del software de Autodesk Inventor.	46
Figura 19: Análisis de deformación de martillo por fuerza centrífuga.....	47
Figura 20: Vista de perfil del primer diseño de abastecimiento.	47
Figura 21: Vista Isométrica del primer diseño de abastecimiento.....	48
Figura 22: Vista de acoplamiento real para el primer diseño.	48
Figura 23: Vista de acoplamiento para el primer diseño en el modelo virtual.	49
Figura 24: Configuración de propiedades físicas para el modelo virtual del primer diseño de abastecimiento.	50
Figura 25: Simulación de trayectoria, primer impacto con la pieza de abastecimiento.	51
Figura 26: Simulación de trayectoria, segundo impacto con las placas internas del molino de martillos.....	51
Figura 27: Simulación de trayectoria, tercer impacto en la parte central del martillo. ..	52
Figura 28: Rotura por efecto abrasivo de los impactos del mineral.	53

Figura 29: Martillo utilizado en el proceso de conmiución de minerales con el diseño de abastecimiento inicial (Mayor desgaste en el centro).	53
Figura 30: Vista de perfil del diseño a proponer.	57
Figura 32: Vista frontal de la sección de distribución en el diseño a proponer.	58
Figura 31: Vista isométrica del diseño a proponer.	58
Figura 33: Vista de acoplamiento con la segunda parte del diseño a proponer.	59
Figura 34: Simulación de acoplamiento para el modelo virtual del diseño propuesto... ..	59
Figura 35: Simulación de trayectoria, segundo impacto con las placas internas del molino de martillos.	60
Figura 36: Simulación de trayectoria, primer impacto con la pieza de abastecimiento propuesta.	61
Figura 37: Simulación de trayectoria, tercer impacto con el martillo.	61
Figura 38: Vista superior del mineral chocando con la zona lateral del martillo.	62
Figura 39: Vista superior del mineral chocando con la zona central del martillo.	62
Figura 40: Construcción del diseño propuesto.	63
Figura 41: Acoplamiento de ambas partes que componen el diseño propuesto.	64
Figura 42: Martillos utilizados en el proceso de conminución de mineral con el diseño propuesto (Desgaste uniforme en el centro y laterales).	64

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1: Diagrama de flujo utilizado para expresar el proceso de análisis.	42
Gráfica 2: Diagrama de flujo para el análisis del proceso de abastecimiento con el funcionamiento del diseño inicial.....	43
Gráfica 3: Diagrama de flujo para el análisis del proceso de abastecimiento con el funcionamiento del diseño final.	44
Gráfico 4: Tonelaje procesado por cada juego de martillos.	55
Gráfica 5: Masa perdida por cada juego de martillos durante el proceso de conminución de mineral.	55
Gráfico 6: Masa perdida por cada martillo durante el proceso de conminución de mineral.....	56
Gráfica 7 : Tonelaje procesado por cada juego de martillos con el diseño propuesto....	66
Gráfica 8: Masa perdida por cada juego de martillos durante el proceso de conminución de minerales con el diseño propuesto.....	66
Gráfica 9: Masa perdida por cada martillo durante el proceso de conminución de minerales con el diseño propuesto.....	67
Gráfica 10: Comparación de variación de masa por cada juego de martillos entre el diseño inicial y el diseño propuesto.....	68
Gráfica 11: Comparación de tonelaje procesado por cada juego de martillos entre el diseño inicial y el diseño propuesto.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS

V	: velocidad lineal
r	: Radio
F cent	: Fuerza centrífuga.
V_f	: Velocidad final del cuerpo posterior al impacto.
V_i	: Velocidad inicial del cuerpo previo al impacto.
Δt	: Variación de tiempo.
m	: Masa del cuerpo.
TN	: Tonelaje.
TMSD	: Toneladas métricas por día.
HP	: Unidad de medida para la potencia Caballos Fuerza.
\$: dólar americano.
S/.	: Sol peruano.
%	: Tanto por cada 100 unidades.
S.A.C.	: Sociedad Anónima Cerrada.
Kg	: Kilogramo.
”	: Pulgadas.
Ton	: toneladas.
Δm	: Variación de masa.
m_i	: Masa inicial.
m_f	: Masa final.
RPM	: Revoluciones por minuto.
g	: Aceleración gravitacional
Chute	: Hace referencia a la pieza del sistema de abastecimiento.

RESUMEN

El estudio se centró en optimizar el diseño del sistema de abastecimiento del molino de martillos en la planta Muki Kutana SAC, con el objetivo de reducir el desgaste excesivo en el centro de los martillos y prolongar su vida útil. Mediante el uso de modelado 3D en Inventor y simulaciones, se diseñó un nuevo sistema que mejoró la distribución uniforme del mineral procesado sobre los martillos, favoreciendo un desgaste equilibrado en sus partes laterales. El diseño optimizado permitió usar 2.23 kg adicionales de fierro por cada juego de martillos antes de su reemplazo, disminuyendo significativamente las paradas de planta por mantenimiento e incrementando el tonelaje procesado. Este cambio mejoró también la granulometría del producto final y redujo los costos operativos asociados al cambio frecuente de martillos. El análisis comparativo entre el diseño original y el optimizado mostró que este último no solo incrementó la eficiencia operativa, sino que también aumentó la sostenibilidad y productividad del proceso de conminución, validando la importancia de innovaciones en el diseño de equipos industriales. La implementación del nuevo diseño demostró su impacto positivo al mejorar la durabilidad de los martillos, reducir el desgaste desigual y optimizar el rendimiento de la planta, reflejando un avance significativo en términos de costos y eficiencia global.

Palabras clave: Sistema de abastecimiento, simulación, insumos, eficiencia, diseño 3D.

ABSTRACT

The study focused on optimizing the design of the hammer mill supply system at the Muki Kutana SAC plant, with the aim of reducing excessive wear in the center of the hammers and prolonging their useful life. Through the use of 3D modeling in Inventor and simulations, a new system was designed that improved the uniform distribution of the processed ore on the hammers, favoring balanced wear on their lateral parts. The optimized design allowed the use of an additional 2.23 kg of iron for each set of hammers before replacement, significantly reducing plant downtime for maintenance and increasing the tonnage processed. This change also improved the granulometry of the final product and reduced the operating costs associated with the frequent change of hammers. The comparative analysis between the original and the optimized design showed that the latter not only increased operational efficiency, but also increased the sustainability and productivity of the comminution process, validating the importance of innovations in the design of industrial equipment. The implementation of the new design demonstrated its positive impact by improving the durability of the hammers, reducing uneven wear and optimizing plant performance, reflecting a significant advance in terms of costs and overall efficiency.

Keywords: Supply system, simulation, inputs, efficiency, 3D design.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

La planta de chancado y molienda de minerales Muki Kutana S.A.C, ubicada en el departamento de La Libertad se encarga de brindar servicios de conminución de minerales a través de un circuito de molienda que cuenta con una chancadora de mandíbulas, un molino de martillos y dos fajas de transporte, siendo la faja 1 la que recibe el mineral chancado y transportándolo hacia el molino de martillos, que tritura el mineral y lo deja caer en la faja 2 la cual transporta el mineral triturado a la estación de pesado y ensacado, esta investigación centra su análisis en el desgaste que presentan los martillos con respecto al diseño de la estructura que recibe el mineral chancado de la faja1, hacia el molino de martillos.

El problema se puede definir de la siguiente manera: ¿Qué efecto tiene la modificación del diseño de abastecimiento al molino en el desgaste de los martillos en la planta de conminución de minerales Muki Kutana S.A.C.? Teniendo esto en cuenta, la presente investigación tiene como hipótesis: La modificación del diseño de abastecimiento al molino de martillos en la planta Muki Kutana S.A.C. mejorará la distribución del mineral y, por lo tanto, con esto se incrementa el porcentaje de desgaste en los martillos utilizados antes de su cambio sin afectar la granulometría del resultado.

El presente trabajo de investigación se justifica en que el desgaste no uniforme de los martillos es un problema común en las plantas de conminución de minerales. Esto se debe a que la configuración del abastecimiento puede afectar a la distribución del material en el molino, lo que puede afectar al desgaste de los martillos.

El objetivo general de esta tesis es describir el efecto de modificar el diseño de abastecimiento al molino en el desgaste de los martillos. Para ello, se evaluarán diferentes configuraciones de abastecimiento, evaluando su impacto en el desgaste de los martillos y en los costos del proceso. Para mayor detalle se tiene los siguientes objetivos principales: Medir la masa de los martillos antes y después del proceso de conminución con la finalidad de expresar el desgaste en un porcentaje con respecto a su masa, proponer el nuevo con diseño con los cambios que afectarán la distribución del material, para realizar el nuevo diseño y analizar la trayectoria que realiza el mineral mediante simulaciones nos apoyaremos del software de Autodesk Inventor.

La presente investigación se organizó en cinco capítulos los cuales se detallan a continuación:

En el capítulo I, se describe el planteamiento del problema, hipótesis, justificación y los objetivos de esta investigación. En el capítulo II, contiene el marco teórico, mencionando antecedentes teóricos sobre diseño de molinos de martillos y definiciones de términos relacionados a la presente investigación. En el capítulo III, se detalla los materiales y métodos, así como la ubicación geográfica, metodología de la investigación, técnicas en instrumentos de recolección de datos, procedimientos, análisis de datos y resultados con respecto a los diferentes diseños. En el capítulo IV, se presenta el análisis y discusión de resultados, exponiendo los resultados obtenidos y a la vez contrastándose con la hipótesis. En el capítulo V, se presentan las conclusiones a las que se ha llegado con el presente estudio y recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas al tema.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 Antecedentes Internacionales

(Vilela, 2018). Riobamba- Ecuador. En su tesis: “Repotenciación y automatización del molino de martillo en el laboratorio de procesos industriales de la facultad de ciencias”.

Realizó la repotenciación y automatización del molino de martillos del Laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Tras una inspección inicial y pruebas con 1000 g de frejol seco, se identificaron fallas como la ausencia de finos en la molienda y problemas derivados de la falta de mantenimiento. Para la repotenciación, se efectuó un mantenimiento general, incluyendo limpieza, engrasado y alineación. En la automatización, se consideró instalar sensores y controles avanzados, pero los costos llevaron a implementar un temporizador, pulsadores on/off, luces piloto, botón de emergencia y una pantalla LED. La validación posterior, usando la misma técnica de prueba, mostró resultados favorables, con una eficiencia de molienda del 97,94% para granos de frejol tras las mejoras aplicadas.

(Gaspar, 2013) México. En su tesis muestra las consideraciones técnicas aplicadas a una planta de beneficio, para lograr un incremento de 1500 t/día a 2000 t/día, c La mineralogía y geografía del lugar facilitan estudios de factibilidad técnica y financiera. El proceso actual beneficia 1500 t/día mediante flotación diferencial, obteniendo concentrados de Pb-Ag, Cu y Zn, superando el arreglo previo de 1000 t/día que producía un concentrado bulk de Pb-Ag-Cu y Zn. Se realizaron balances de masa para establecer parámetros operativos y calcular la capacidad de los equipos, visualizando opciones para escalar el proceso. Con estos resultados, se propuso un diseño con nuevos arreglos de equipos y adquisiciones necesarias para optimizar la producción y maximizar la recuperación de minerales valiosos.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

(Luna, 2019). Arequipa-Perú. En su tesis “Evaluación y mantenimiento de un molino de martillos para minerales oxidados.” El molino de martillos, ampliamente usado en minería, destaca por su bajo desgaste en los elementos de conminución, lo que facilita su mantenimiento y reparación en poco tiempo. Para mejorar su eficiencia energética, se

propone instalar un separador cónico que minimice pérdidas de energía, un aspecto crítico dado el alto consumo en esta etapa del proceso y su influencia en el producto final. Además, el impacto ambiental y en los trabajadores es mínimo gracias al uso de una máquina neumática que aspira el polvo generado durante la trituración.

(Córdova J. H., 2016) En su tesis “Diseño del sistema motriz de un molino de martillos con capacidad de procesamiento de 4 ton/h de cal hidratada” Se calcula el costo de construir un molino de martillos basado en propiedades físicas como el número de martillos, la producción de granos por minuto, las revoluciones del motor, la fuerza de impacto y la potencia de molienda y carga. Se concluye que se necesita un motor trifásico de 37.3 kW (50 HP) y 1775 rpm, con un sobredimensionamiento para asegurar una producción de 4 ton/h. El diseño final del molino de martillos está orientado a fragmentar y pulverizar granos de cal hidratada hasta obtener una granulometría de malla N° 100.

(Rivera, 2016) En su tesis Evalúa y propone implementar varias mejoras para aumentar la eficiencia y los ingresos de la empresa. En el área de Balanza, una inversión de \$2,396.58 en supervisión y seguridad generará ingresos adicionales de \$8,500 mensuales. En el Almacén de minerales, la optimización del proceso incrementará la capacidad de almacenamiento en un 32%, lo que se traducirá en un aumento proporcional en el ingreso por procesamiento. En el circuito de chancado, una inversión de \$2,044.94 en automatización mejorará la eficiencia en un 17%, aumentando los ingresos mensuales por procesamiento en \$36,534.00. Finalmente, mejorar la distribución y almacenamiento de las rumas de mineral logrará un incremento del 32% en la eficiencia del almacenamiento, generando ingresos adicionales de \$4,336.00 al mes.

(CLAUDIO, 2022) La conminución es el proceso que reduce el tamaño de los minerales, separando los valiosos de la ganga. Este proceso se realiza en el circuito de molienda, utilizando equipos que desgastan, aplastan o causan choques para obtener la granulometría deseada. En el sector minero, uno de los mayores retos es el procesado de los minerales, lo cual es clave en plantas de cianuración y concentración. En la planta Korione, el problema radica en la remolienda para procesar mineral, lo que permitiría aumentar la capacidad de 270 a 300 TMSD. Para lograrlo, se modificaron las alimentaciones de los molinos 1 y 3, y se implementaron válvulas en los cajones de retorno, mejorando así el circuito de molienda.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Teoría de mejora de procesos

La gestión de los procesos es de suma importancia para estandarizar y llevar a cabo una adecuada supervisión y control de las actividades realizadas en la organización. Motivo por el cual es necesario analizar a fondo los procesos realizados en la empresa no solo para establecer controles sino también para mejorarlos y así favorecer el crecimiento de la empresa. De “Gestión y Mejora de Procesos” (EUSKALIT, 2012)

2.2.1.1 Definición de procesos

Se puede definir un proceso como cualquier secuencia repetitiva de actividades que una o varias personas (Intervinientes) desarrollan para hacer llegar una Salida a un Destinatario a partir de unos recursos que se utilizan (Recursos amortizables que necesitan emplear los intervinientes) o bien se consumen (Entradas al proceso).

- El proceso tiene capacidad para transformar unas entradas en salidas.
- El proceso está constituido por actividades internas que de forma coordinada logran un valor apreciado por el destinatario del mismo.

Las actividades internas de cualquier proceso las realizan personas, grupos o departamentos de la organización.

- Esta secuencia de actividades se puede esquematizar mediante un Diagrama de Flujo.
- Son los destinatarios del proceso, internos o externos a la organización, los que en función de sus expectativas con relación al mismo juzgarán la validez de lo que el proceso les hace llegar.
- Merece la pena invertir tiempo en mejorar el proceso, ya que los resultados se van a multiplicar por el n^o de veces que se repite el proceso.

2.2.1.2 Descripción de procesos

- Para gestionar y mejorar un proceso es necesario, en primer lugar, describirlo adecuadamente.
- Los elementos que van a permitir describir el proceso son:

a. Salida y Flujo de salida

- “Salida concreta” es una unidad de resultado producida por el proceso. Es lo que “genera” el proceso.
- Debido al funcionamiento constante y repetitivo del proceso el resultado se puede visualizar como un “flujo” constante (similar al agua que sale de un grifo).

b. Destinatario del flujo de salida

- Es la persona o conjunto de personas que reciben y valoran lo que les llega desde el proceso en forma de flujo de salida.
- Los destinatarios del proceso tienen un conjunto de expectativas respecto a las salidas (para ellos entradas) que reciben del proceso anterior. Se pueden definir las expectativas como las creencias (afirmaciones que el destinatario da por ciertas) relacionadas con cómo debe ser lo que el proceso “le hace llegar”.

c. Los intervinientes

- Son las personas o grupos de personas que desarrollan la secuencia de actividades del proceso.

d. La secuencia de actividades

- Es la descripción de las acciones que tienen que realizar los intervinientes para conseguir que al destinatario le llegue lo que se pretende que llegue.

e. Recursos utilizados en el proceso

- Son todos aquellos elementos materiales o de información que el proceso consume o necesita utilizar para poder generar la salida.

f. Indicadores.

Son mediciones del funcionamiento de un proceso.

- ❖ Los indicadores pueden ser de eficacia, cuando miden lo bien o lo mal que un proceso cumple con las expectativas de los destinatarios del mismo.
- ❖ Los indicadores pueden ser de eficiencia, cuando miden el consumo de recursos del proceso.

2.2.1.3 Mejora de un proceso

Para mejorar un proceso en primer lugar se debe hacer ocurrir el proceso de la forma estandarizada propuesta y luego analizarlo para mejorarlo.

a. Hacerlo ocurrir tal y como queremos que ocurra.

Para poder mejorar un proceso primero hay que hacerlo ocurrir. Es decir, hay que:

- ❖ Definir la forma de ejecutar del proceso. Definir un conjunto de pautas o de instrucciones sobre cómo debe ser ejecutado el proceso.
- ❖ Ejecutar las actividades del proceso, según las instrucciones anteriormente establecidas.
- ❖ Comprobar que el proceso se ha desarrollado según estaba previsto (según las instrucciones).

Garantizar que la próxima repetición del proceso se va a desarrollar de acuerdo con las instrucciones. ¿Qué desviaciones respecto a las instrucciones se han producido?, ¿Cómo se pueden evitar en próximas ocasiones?

Este ciclo de actividades garantiza que hay una “forma definida o estabilizada” de hacer las cosas y que efectivamente el proceso se ajusta a esta “forma estabilizada”.

b. Mejorarlo una vez que lo hemos hecho ocurrir.

Cuando a pesar de realizar correctamente las actividades definidas para el proceso sigue habiendo problemas (quejas de los destinatarios, despilfarro de recursos, etc.) o el proceso no llega a adaptarse a lo que necesita el cliente (necesidad de reestructurar el proceso) es necesario aplicar el ciclo de mejora.

Una acción de mejora es toda acción destinada a cambiar la “forma en que queremos que ocurra” un proceso. Estas mejoras lógicamente se deben reflejar en una mejora de los indicadores del proceso. Por ejemplo, el indicador de % de tornillos fuera de tolerancia estaba en un 15%, se han realizado actividades de mejora y en la actualidad el indicador está en un 4% de tornillos fuera de tolerancia.

2.2.2 Método para definir procesos

Para definir procesos se cuenta con dos métodos: Métodos para toma de datos y Métodos para análisis de procesos, los cuales se tratarán a continuación. (CHASE Richard B, 2009)

2.2.2.1 Recolección de datos con la herramienta SIPOC

El SIPOC se utiliza para:

- ❖ **Mapear el proceso:** Proporciona una visión general y estructurada de un proceso desde el inicio hasta el final.
- ❖ **Identificar componentes clave:** Ayuda a desglosar y entender cada uno de los elementos que participan en el proceso.

- ❖ **Mejorar la comunicación:** Facilita la comunicación y el entendimiento entre los diferentes equipos o departamentos involucrados.
- ❖ **Definir el alcance del proceso:** Permite establecer los límites y el propósito del proceso, asegurando que todos los participantes tengan una comprensión común.

El SIPOC es, por lo tanto, una herramienta integral que no solo describe cada componente de un proceso, sino que también ayuda a identificar oportunidades de mejora, optimizar la eficiencia y asegurar que todos los actores involucrados comprendan su rol y el impacto de sus acciones en el resultado final.

La palabra SIPOC es un acrónimo, formado por los siguientes elementos (Rivera, 2016)

- S Suppliers = Proveedores
- I Inputs = Entradas o insumos
- P Process = Proceso
- O Outputs = Productos
- C Customers = Cliente

a. Proveedores:

Son las entidades que proporcionan los insumos al proceso. Como puede ser proveedores externos (Pequeños mineros) o proveedores internos (encargado de balanza, encargado de recepción de minerales)

b. Insumos:

Se refiere a la materia prima, servicio y/o información necesarios para el proceso. Como puede ser los minerales brutos, documentos de balanza, etc.

c. Proceso:

Conjunto de actividades que tienen como finalidad agregar valor a los resultados del proceso. Como el proceso de recepción de minerales, por ejemplo.

d. Cliente:

Es el usuario de los resultados del proceso. Como así también pueden ser cliente interno (Encargado de recepción de minerales, encargado de circuito de chancado). Los elementos del SIPOC siguen el flujo mostrado en la siguiente figura:

Tabla 1: Formato de registro SIPOC

Diagrama SIPOC				
Proveedor	Insumos	Proceso	Salidas	Cliente

Fuente: (Rivera, 2016)

2.2.3 Método para analizar procesos

La herramienta que se empleará para analizar los datos obtenidos del proceso de conmiución de minerales será diagrama de ISHIKAWA (CHASE Richard B, 2009).

Diagrama de ISHIKAWA También llamado diagrama de causa y efecto o diagrama de espina de pescado, fue propuesto por el Dr. Kaoru Ishikawa en 1943, y es usado para analizar problemas y encontrar sus respectivas soluciones con la finalidad de mejorar procesos, productos y servicios. (Rivera, 2016)

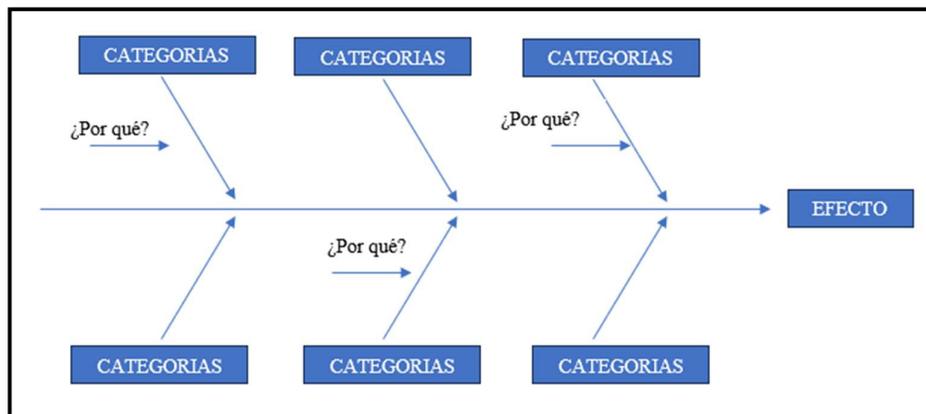


Figura 1: Diagrama de ISHIKAWA (Rivera, 2016)

2.2.4 Principios mecánicos utilizados para reducción de tamaño

(Córdova J. H., 2016) La conmiución consiste en la fragmentación de material utilizando ciertos principios mecánicos. Las propiedades del material a moler determinar la conveniencia de utilizar cualquiera de los principios mecánicos mostrados.

Los principales principios mecánicos utilizados son: Impacto, Cizalladura, Compresión, Corte.

2.2.4.1 Leyes energéticas

Se puede decir que las ecuaciones básicas que rigen el fenómeno de la reducción de tamaño no están perfectamente definidas, pero partiremos por los siguientes puntos

- ❖ La rotura se produce por esfuerzos de tracción, compresión o cizallamiento.
- ❖ La energía requerida para la rotura es difícil de determinar, pero puede estimarse a partir del tamaño o del área superficial de las partículas.
- ❖ La expresión de Hukki relaciona la energía requerida con el tamaño y el área superficial de las partículas.

Se presenta a continuación la expresión genérica desarrollada por Hukki a partir de las leyes de Charles y Holmes:

$$dE = K[S^n \cdot dS]$$

Donde:

E: Energía utilizada para la reducción de tamaño deseada

S: Área superficial

K: constante que depende de la resistencia de la roca

n: constante

El valor de n varía dependiendo del tamaño de la molienda. La expresión de Rittinger es aplicable a tamaños de molienda gruesa, mientras que la expresión de Kick es aplicable a tamaños de molienda más fina.

- n= -2 (Ley de Rittinger)
- n= -1 (Ley de Kick)
- n= -1.5 (Ley de Bond)

La expresión de Bond (n= -1.5) es un valor intermedio cubre casi toda la gama de partículas.

$$E = 2K \left[\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right]$$

Donde “K” es una constante que depende de las características del mineral. Para tamaños de reducción del mineral en un proceso de reducción en circuito cerrado, Bond derivó la energía específica para molienda como:

$$E_G = 10. w_i \left[\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right] \text{ (KW * h/Tc)}$$

2.2.4.2 Teoría de choques

Se llama choque o colisión entre dos cuerpos a un fenómeno en el que los cuerpos participantes son libres antes y después de la interacción, sobre los que no actúan fuerzas resultantes. La interacción dura un tiempo muy corto (Δt), durante el cual los cuerpos ejercen entre si fuerzas de cierta intensidad. Los valores de los intervalos de tiempo para los choques varían desde la décima de segundo hasta los microsegundos. (Córdova J. H., 2016).

2.2.4.3 Impulso

El impulso de la fuerza neta es igual al cambio de movimiento del cuerpo, por definición representa el área bajo la curva F vs T. La fuerza neta se considera constante durante el intervalo de tiempo muy corto Δt .

$$I = \Delta p = \int_{t_i}^{t_f} F dt$$

Despejando:

$$F = \frac{m * (V_f - V_i)}{\Delta t}$$

Donde:

F: Fuerza de impacto

m: masa de cuerpo

V_f : Velocidad final del cuerpo posterior al impacto

V_i : Velocidad inicial del cuerpo previo al impacto

2.2.5 Molinos utilizados en la Industria de conmiución de minerales

2.2.5.1 Molino de Discos

Existen dos tipos de molinos de discos: los de discos normales y los de discos vibratorios u oscilantes.

- ❖ **Molino de Discos Normal:** Se utiliza en diversas industrias como la minería, metalurgia, siderurgia, cementera, agroindustria y laboratorios.

- ❖ **Molino de Discos Vibratorios:** Se utiliza principalmente en laboratorios.
- a. Molino de Discos Normal**
 - ❖ **Mecanismo de Molienda:** La molienda se realiza mediante presión y frotación (o fuerza de cizallamiento) entre dos discos.
 - ❖ **Configuración de los Discos:** Los discos pueden ser lisos, dentados o tener diferentes relieves, y se ajustan según el tamaño de grano deseado.
 - ❖ **Movimiento:** Los discos giran en direcciones opuestas o uno permanece fijo mientras la otra gira.

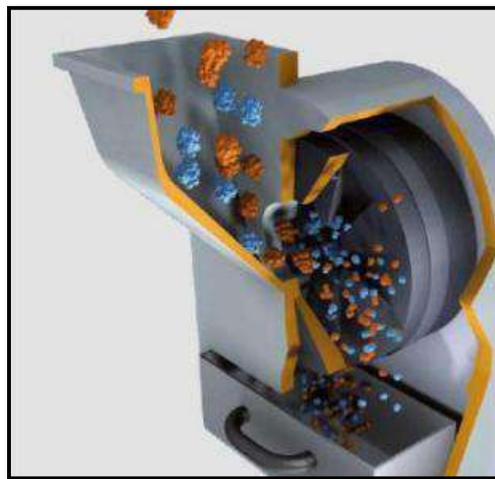


Figura 2: Molino de Discos Normal (Luna, 2019)

b. Molino de Discos Vibratorios u Oscilantes

- ❖ **Mecanismo de Molienda:** La molienda se realiza mediante impacto y fricción entre el material y los elementos del sistema dentro del recipiente.

- ❖ **Elementos del Sistema:** Estos elementos incluyen una masa en forma de disco y un anillo.

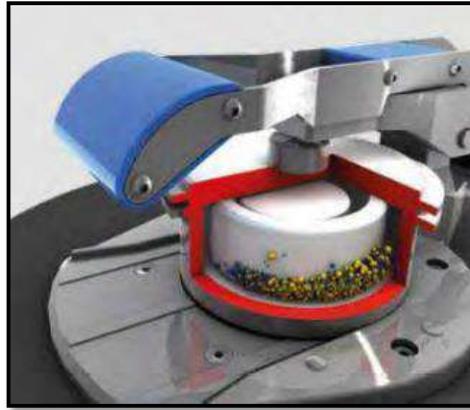


Figura 3: Molino de Discos Vibratorios (Luna, 2019)

2.2.5.2 Molino de Bolas

El molino de bolas se utiliza para la molienda fina de minerales y es común en la industria minera, metalúrgica, siderúrgica y cementera. Es considerado un molino convencional, con una proporción de longitud a diámetro mayor a 1 pero menor a 2. (Sagastegui, 2020)

- ❖ **Diseño:** Consiste en un cilindro horizontal que contiene bolas de acero.
- ❖ **Mecanismo de Molienda:** El material a moler se introduce en el cilindro. Al girar el cilindro, las bolas se elevan y luego caen, creando un efecto de “cascada”.
- ❖ **Reducción de Tamaño:** El material se muele mediante el impacto y la fricción de las bolas en movimiento.
- ❖ **Molienda Húmeda:** Generalmente, se realiza en un entorno húmedo, y el material molido se descarga con agua.
- ❖ **Molienda Seca:** Cuando se realiza en seco, la descarga se hace mediante corrientes de aire.

- ❖ **Variedad de Cámaras:** Estos molinos pueden tener una sola cámara o compartimento, o varias cámaras, lo que permite realizar diferentes tipos de molienda en el mismo equipo.



Figura 4: Molino de Bolas (Luna, 2019)

2.2.5.3 Molino de barras

El molino de barras se utiliza para la molienda gruesa de minerales, por lo que es común en la industria minera, metalúrgica y siderúrgica. Es considerado un molino convencional, similar al molino de bolas, con una proporción de longitud a diámetro mayor a 1 pero menor a 2.

- ❖ **Diseño:** Consiste en un cilindro horizontal que contiene barras de acero.
- ❖ **Mecanismo de Molienda:** Las barras tienen una longitud similar a la del cilindro. Cuando el cilindro gira, las barras se elevan y luego caen, creando un efecto de “cascada”.
- ❖ **Reducción de Tamaño:** El material a moler se introduce en el cilindro y se muele mediante el impacto y la fricción de las barras en movimiento.
- ❖ **Molienda Húmeda:** Generalmente, se realiza en un entorno húmedo y el material molido se descarga con agua.
- ❖ **Molienda Seca:** Cuando se realiza en seco, la descarga se hace mediante corrientes de aire.



Figura 5: Molino de barras. (MAGOTTEAUX, 2024)

2.2.5.4 Molino autógeno (AG)

Los molinos autógenos, conocidos como “AG” por sus siglas en inglés, se utilizan en la minería y son un tipo de molino poco convencional. Una característica importante de estos molinos es que su longitud es menor que su diámetro.

- ❖ **Diseño:** Son cilindros horizontales que giran y tienen forma de tambor.
- ❖ **Mecanismo de Molienda:** Cuando el cilindro gira, el material que se va a moler (sólidos) se mueve en su interior.
- ❖ **Movimiento:** Este material se eleva con el giro del tambor y luego cae, provocando un movimiento llamado “catarata” y “cascada”.
- ❖ **Reducción de Tamaño:** A medida que el material cae, se muele por impacto y fricción contra otros trozos del mismo material.

Características Clave

- ❖ **Sin Elementos de Molienda:** A diferencia de otros molinos, los molinos autógenos no utilizan bolas de metal o barras para moler el material.
- ❖ **Molienda Húmeda:** Normalmente, se realiza en un ambiente húmedo, lo que ayuda a procesar el material de manera más eficiente.
- ❖ **Reducción Significativa:** Pueden reducir el tamaño del material de manera muy efectiva, logrando grandes relaciones de reducción.



Figura 6: Molino autógeno (Luoyang Zhongtai Industries Co., Ltd., 2015)

2.2.5.5 Molino Semi Autógeno (SAG)

Los molinos semi autógenos, conocidos como “SAG”, se utilizan en la minería y son un tipo de molino no convencional con una relación longitud/diámetro menor a 1. (Dilmer Rodriguez Medina, 2020)

- ❖ **Diseño:** Consiste en un cilindro horizontal con forma de tambor.
- ❖ **Mecanismo de Molienda:** El tambor contiene una pequeña cantidad de bolas de acero. Al girar el tambor, el material a moler se mueve en su interior.
- ❖ **Movimiento:** El material y las bolas se elevan con el giro del tambor y luego caen, creando un efecto de “catarata” y “cascada”.
- ❖ **Reducción de Tamaño:** El material se muele por impacto y fricción debido a la caída de las bolas y el material.
- ❖ **Uso de Bolas:** A diferencia de los molinos autógenos (AG), los molinos SAG utilizan bolas de acero para ayudar en la molienda.
- ❖ **Molienda Húmeda:** Generalmente, la molienda se realiza en un entorno húmedo.
 - ❖ **Alta Eficiencia:** Estos molinos logran una gran reducción del tamaño del material.

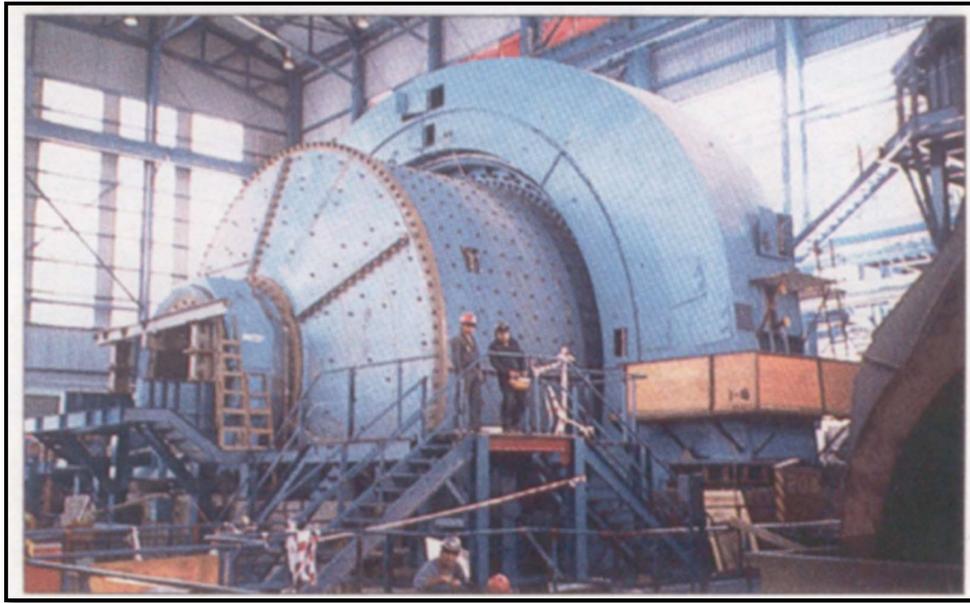


Figura 7: Molino Semi Autógeno (SAG). (Blanco, 2018)

2.2.5.6 Molino de martillos

Cámara de Molienda con Rotor de Eje Horizontal: La molienda ocurre dentro de una cámara que contiene un rotor de eje horizontal. Este rotor está equipado con múltiples martillos dispuestos perpendicularmente al eje, lo que permite un impacto eficiente y repetitivo sobre el material mineral.

Martillos de Alta Resistencia: Los martillos, hechos de materiales de alta resistencia y durabilidad, giran a velocidades elevadas, proporcionando la energía cinética necesaria para fracturar y pulverizar los minerales. Estos pueden ser fijos o móviles, dependiendo del diseño específico del molino.

Impacto y Fracturación del Material: Al girar el rotor, los martillos impactan directamente los minerales, fracturándolos y reduciéndolos en tamaño. Este impacto se combina con la abrasión contra la superficie interna de la cámara, contribuyendo a una molienda más eficiente.

Criba de Retención y Control de Granulometría: La salida del material molido está controlada por una criba o rejilla de retención que asegura que solo las partículas que cumplen con la granulometría deseada puedan salir de la cámara de molienda. Esto permite un control preciso del tamaño de las partículas finales.

Aplicaciones en la Industria de Minerales: Los molinos de martillos son utilizados para una amplia variedad de minerales, incluyendo carbonatos, fosfatos, óxidos metálicos y minerales de silicato. Su capacidad para manejar materiales duros y abrasivos los hace indispensables en operaciones de minería y procesamiento de minerales, donde la eficiencia y la precisión en la reducción de tamaño son cruciales.

Fuente: Fotografía propia 2024



Figura 8: Molino de martillos

2.2.6 Simulación de procesos

Una simulación de procesos es una técnica que utiliza modelos matemáticos y algoritmos computacionales para replicar y analizar el comportamiento de sistemas reales en un entorno virtual. En el contexto de una planta de procesamiento de minerales, la simulación de procesos tiene varias aplicaciones y beneficios (Monsalves, 2014):

Implica la creación de un modelo digital del proceso de producción o de una operación específica.

Utiliza software especializado para imitar el comportamiento real de los sistemas.

Permite experimentar con diferentes variables y escenarios sin interferir con la operación real.

2.2.6.1 Beneficios de la simulación de procesos en una planta de procesamiento de minerales

1. Optimización de procesos:

Permite identificar y eliminar cuellos de botella. Ayuda a encontrar las mejores condiciones operativas para maximizar la eficiencia y la productividad.

2. Reducción de costos:

Minimiza la necesidad de pruebas físicas costosas y a menudo arriesgadas.

Ayuda a reducir el consumo de energía y de reactivos al optimizar las condiciones del proceso.

3. Mejora en la toma de decisiones:

Proporciona una comprensión profunda del impacto de diferentes variables en el proceso.

Facilita la evaluación de diferentes estrategias y tecnologías antes de implementarlas.

4. Capacitación y formación:

Proporciona una herramienta educativa para entrenar al personal en la operación y optimización de la planta sin riesgos.

5. Escalabilidad:

Ayuda a predecir el comportamiento de la planta cuando se escala a mayores capacidades.

Permite evaluar la viabilidad de incrementos de capacidad antes de realizar inversiones significativas.

6. Análisis de escenarios:

Permite simular condiciones anómalas o de emergencia para desarrollar planes de contingencia.

2.2.6.2 Autodesk Inventor

Autodesk Inventor es un paquete flexible que se adapta a todas y cada una de sus necesidades de diseño en 2D y 3D. Es un Modelador de sólidos paramétricos desarrollado para el área mecánica en tercera dimensión, utilizando comandos inteligentes esto significa que mediante un solo comando se pueden realizar varias operaciones, además de contener archivos independientes para cada proceso, facilitando de esta manera la operación y organización de los archivos. Permite obtener el desarrollo plano de las mismas; biblioteca de piezas normalizadas de las más importantes normas del mercado; importación y exportación de dibujos generación de planos de taller, listas de materiales. (AUTODESK, 2022)

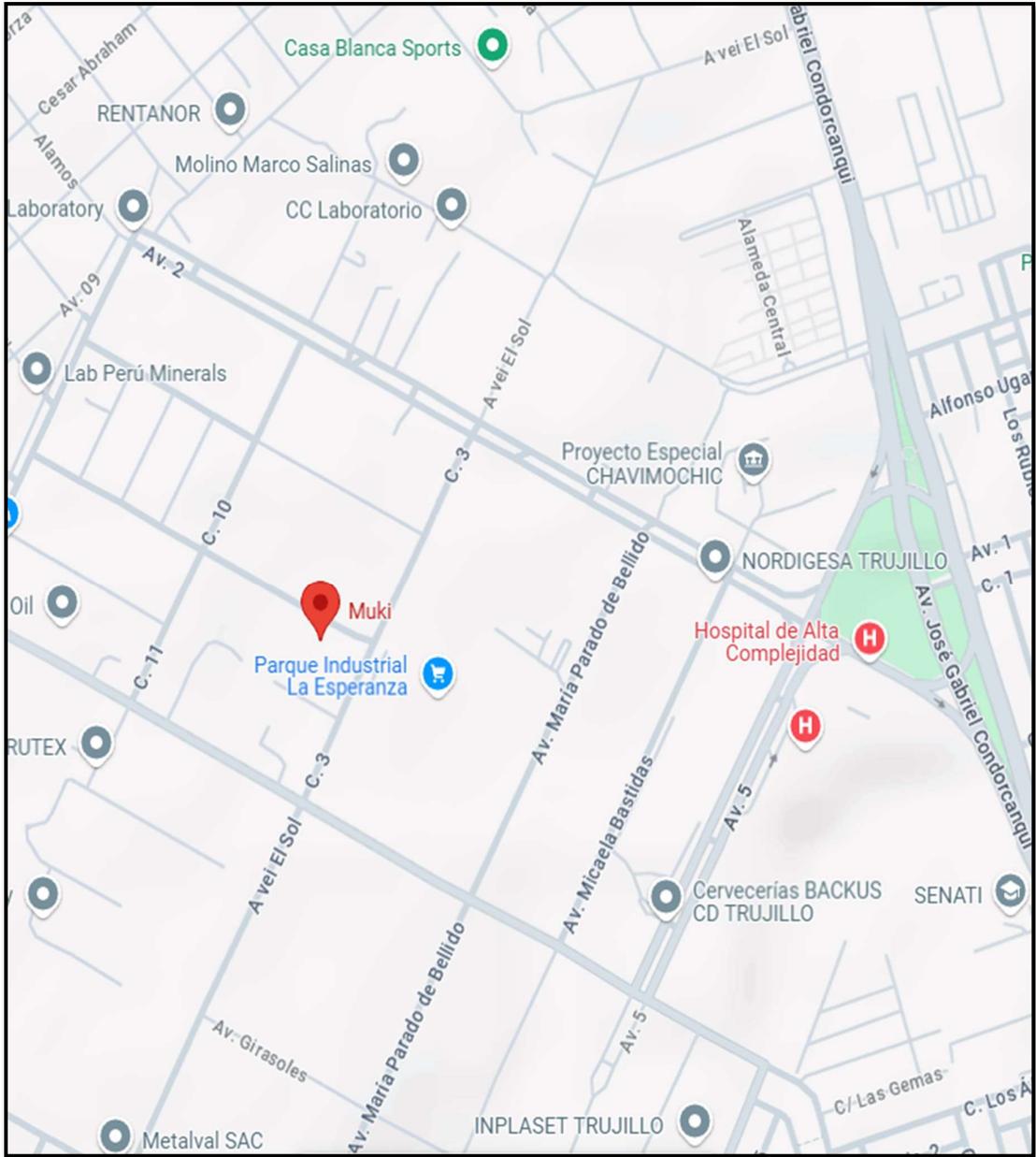
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.1 UBICACIÓN

La investigación se realiza en la planta de chancado y molienda de minerales ubicada geográficamente en el distrito de La Esperanza en la provincia de Trujillo, departamento de La Libertad en Mza. c10 lote. 2 urb. parque industrial. El acceso a la planta tiene las siguientes coordenadas:

Tabla 2: Coordenadas del punto de acceso a la planta Muki Kutana S.A.C.

Ubicación	Este (m)	Norte (m)
Ingreso a planta	713275	9109351



Fuente: Google Maps 2024

3.1.2 Accesibilidad

El inicio del recorrido inicia en Cajamarca, se toma la dirección SSO hacia la provincia de Trujillo en el departamento de La Libertad, posteriormente con dirección NNW hacia el distrito de La esperanza. Se mantiene en la Av. José Gabriel Condorcanqui hasta llegar al hospital de alta complejidad, finalmente se toma la orientación NO hasta llegar a la puerta principal de la planta de conmiución de minerales Muki Kutana S.A.C.

Tabla 3: Accesibilidad a la planta Muki Kutana S.A.C.

Tramo		Estado de vía	Carretera	Transporte	Movilidad	Recorrido	
Desde	Hasta					Distancia (Km)	Tiempo (h)
Cajamarca	Trujillo - La Esperanza	Buena	Asfaltada	Terrestre	Bus	300 + 000	06:00
Trujillo - La Esperanza	Hospital de alta complejidad	Buena	Asfaltada	Terrestre	Taxi	02 + 700	00:15
Hospital de alta complejidad	Planta Muki Kutana S.A.C.	Malo	Asfaltada	Terrestre	Taxi	01 + 200	00:10
TOTAL						303 + 900	06:45

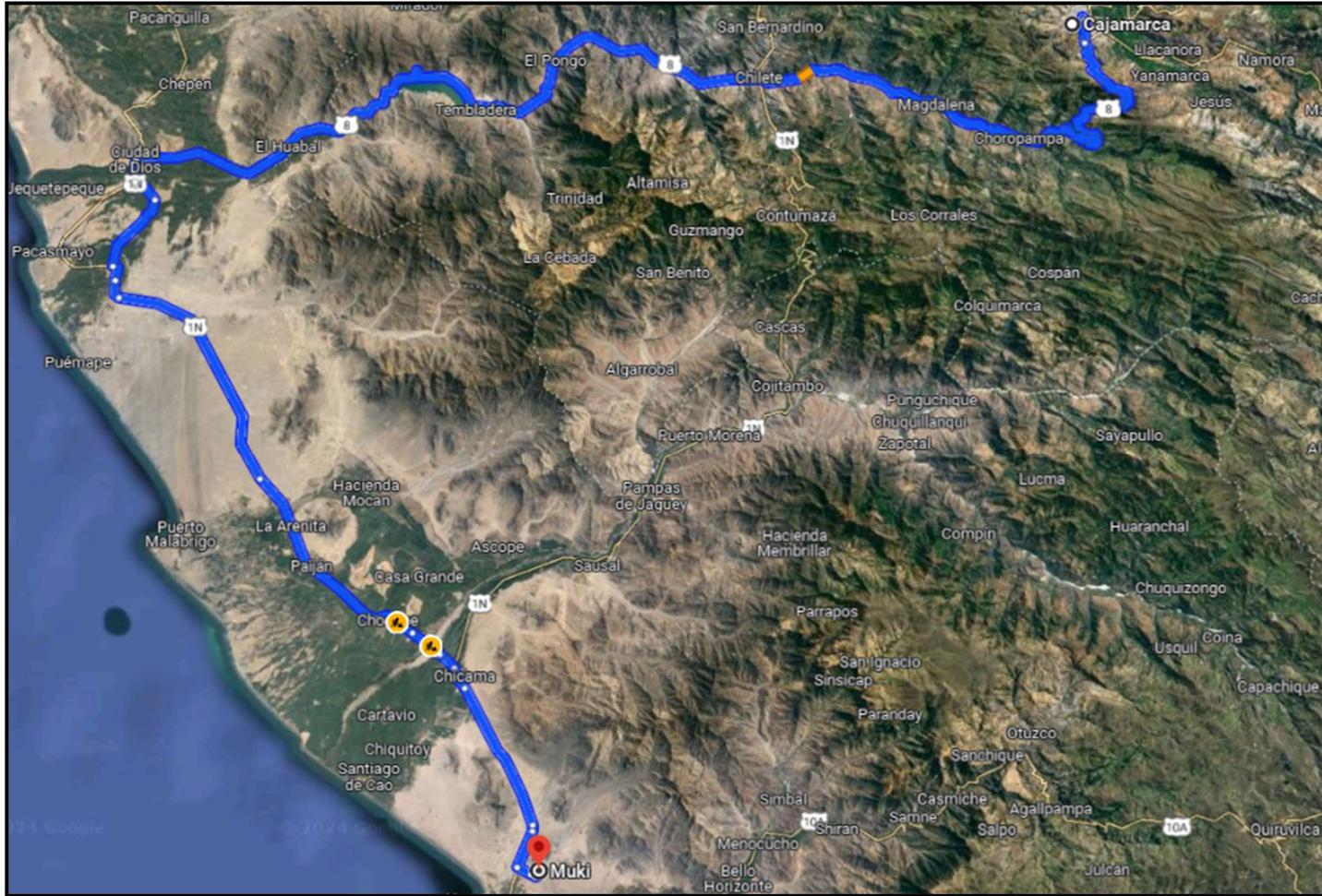


Figura 10: Ruta de acceso a la planta Muki Kutana S.A.C. (Fuente: Google Maps 2024).

3.2 Tipo, nivel, diseño y método de la investigación

De acuerdo con Hernández, (2014), tenemos:

Tipo: El tipo de investigación es aplicada, debido que busca la aplicación o utilización de un problema práctico y dinámico.

Nivel: El nivel de la investigación es descriptivo, correlacional - explicativo, ya que se describirá la situación actual de la variación de masa y forma en el proceso de conmiución de minerales, y se tendrá que evaluar su interacción con la variable independiente para justificar el detalle del proyecto de investigación.

Diseño: El diseño de la investigación es no Experimental, debido a que nos basamos en la observación para su posterior análisis en gabinete.

Método: El método de la investigación es deductivo - inductivo, ya que los reclamos en la granulometría y forma en el desgaste de martillos, nos hacen inferir que algo no está sucediendo con factores como: el sistema de abastecimiento, el diseño del molino por lo que se tendrá que observar y medir las variables presentadas y analizar para ver si el proceso está siendo eficiente.

3.2.1 Población de estudio

Martillos utilizados en la molienda de mineral.

3.2.2 Muestra

48 martillos utilizados en la molienda de mineral.

3.2.3 Unidad de análisis

Variación de masa con respecto a la masa inicial del martillo (Kg)

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1 Técnicas

- ❖ **Observación:** Es identificar y registrar la información con respecto al proceso de conminución y la pérdida de masa que tienen los martillos mediante la medición de masa inicial y la masa final.
- ❖ **Fichaje y tabulación de datos:** Organizar y ordenar la información recolectada en campo como la producción, tiempo de molienda, cantidad de martillos utilizados, masa inicial y final de martillos mediante el uso de tablas para su mejor manejo y comprensión.

- ❖ **Simulación:** Proceso realizado a través del software de Autodesk-Inventor, configurando la propuesta de diseño con materiales y propiedades físicas para permitir al software realizar los cálculos y mostrarnos la simulación.

3.3.2 Instrumentos de recolección de datos

- ❖ **Laptop Lenovo:** Instrumento utilizado en la elaboración de planos, organización y análisis de datos.
- ❖ **Balanza:** Instrumento utilizado para la medición de masa inicial y final de los martillos.
- ❖ **Flexómetro:** Para la toma de medidas mayores a 20 cm del molino.
- ❖ **Vernier:** Para tomas milimétricas de piezas del molino.
- ❖ **Formatos y Fichas:** Para la anotación de datos con respecto al desgaste.
- ❖ **Cámara:** Para registrar la forma del desgaste de martillos.
- ❖ **Lapiceros**
- ❖ **Material de campo:** Lápiz rayador, ácido clorhídrico, lupa, muestras de referencia para estimar dureza.

3.3.3 Softwares

- ❖ **Microsoft Excel:** Para la elaboración de tablas y análisis de datos.
- ❖ **Autodesk Inventor:** Para la elaboración de diseño y simulación del abastecimiento al molino de martillos.
- ❖ **Geocatmin:** Para la extracción de información con respecto a la zona minera.
- ❖ **Microsoft Office:** Para la redacción de informes y construcción de gráficos.
- ❖ **ArcGIS:** Para el manejo y análisis de datos geográficos.
- ❖ **Microsoft Word:** Para la redacción de informe.

3.4 PROCEDIMIENTO

3.4.1 Relación entre Minortex S.A.C. y Muki Kutana S.A.C

Es un grupo económico dedicado al comercio de concentrados, metales y minerales no ferrosos, Minortex S.A.C. empresa miembro que solicita servicios de conmiución de minerales a la planta Muki Kutana S.A.C.

La empresa Minortex S.A.C tiene un contrato con la planta Muki Kutana S.A.C. para procesar el mineral extraído de su concesión AURUM NORTH 2, ubicada entre los

cuadrángulos de Cajabamba 16 – g (cuadrante III) y Santiago de Chuco 17 – g (cuadrante IV), utilizando como base gráfica de coordenadas UTM - DATUM - WGS – 84 -ZONA 18S.

Tabla 4 : Delimitación de zona dentro de la concesión AURUM NORTH 2

Vértice	Este (m)	Norte (m)
A	795203	9116039
B	797956	9116029
C	797941	9113872
D	795196	9113882

Tabla 5: Coordenadas de Bocamina

Ubicación	Este (m)	Norte (m)
Bocamina de Ingreso	795978	9114916

3.4.2 Geología local

La geología del área refleja una historia compleja que abarca desde el Precámbrico hasta el Cenozoico, con una gran diversidad de litologías. En el lado oriental afloran las rocas más antiguas, pertenecientes al Complejo Metamórfico del Marañón, compuesto por gneises y esquistos formados bajo condiciones tectónicas intensas. Sobre este basamento se superponen alternancias de lutitas, areniscas y calizas paleozoicas, que registran ambientes deposicionales marinos someros. Durante el Mesozoico, se desarrolló una potente secuencia sedimentaria iniciada con las lutitas de la Formación Chicama, seguidas por las areniscas y conglomerados del Grupo Goyllarisquizga, ambos vinculados a ambientes marinos y fluviales asociados a tectonismo regional. En el Cenozoico, el Grupo Calipuy destaca con una cobertura volcánica de lavas y piroclastos intercalados con sedimentos, reflejando un magmatismo calcoalcalino típico de subducción. Finalmente, las rocas intrusivas, representadas por el Batolito de la Costa y stocks miocénicos, incluyen granitoides que evidencian magmatismo de arco continental y postorogénico, aportando un contexto propicio para recursos metalogénicos y energéticos.(INGEMET)

3.4.3 Mineral a procesar

La empresa Minortex suele ingresar a la loza de molienda 5 volquetes a la semana cargados con mineral con un tonelaje que varía entre 15 y 35 toneladas. Estos volquetes ingresan con

una guía de remisión de la empresa y un ticket de balanza que indica el tonelaje del mineral a procesar.

MINORTEX S.A.C.
 DOMICILIO FISCAL:
 Urb. Monterrico Chico Av. Manuel Holguín 335 Dpto 1203
 Lima, Lima, Santiago de Surco

RUC: 20545919002
GUIA DE REMISION - REMITENTE
 002- Nº 000229

Punto de partida: Q3000518 N°3/A AV. M. NORTHZ - LA LIBERTAD - STE CHICO - SURCO
 Punto de llegada: M2 A CIO LTZ URB. PARQUE INDUSTRIAL - LA LIBERTAD - TRUJILLO - TRUJILLO

EMPRESA DE TRANSPORTE: MANILLA VENTURA
 Nombre o razón social: EAEP
 RUC: 104281909

Marca y placa: FAL-BUX-014
 Cert. de inscripción: 15M23023048E
 Licencia: D/1318499
 Chofer: JOEL VERA LOPEZ

FECHA DE EMISIÓN: 24-07-2023
 NOMBRE O RAZÓN SOCIAL DEL DESTINATARIO: MUKI KUTANA SAC
 RUC: 20608455885
 FECHA DE INICIO DE TRASLADO: 24-07-2023

ITEM	DESCRIPCION	CANT.	U/M	PESO
01	MINERAL POLITETÁJICO A GRANUL	15	m ³	

Motivo del Traslado:
 Venta Transformación Devolución Importación Entre establecimientos de la misma empresa Recojo de bienes transformados
 Compra Consignación Emisor itinerante Exportación Venta sujeta a confirmación Emisor traslado zona primaria
 Venta con entrega a terceros RUC o DNI Apellidos y Nombres Otros

MINORTEX S.A.C.
 RUC: 20545919002
 ALMACEN DE MINERALES
 p. MINORTEXSAC

DESTINATARIO
 RECIBI CONFORME

Fuente: Fotografía propia 2024

Figura 11: Guía de Remisión de la empresa Minortex S.A.C

3.4.4 Mineralogía

Antes de comenzar el procesamiento en la planta, se realizaron pruebas físicas de campo sobre las muestras de mineral extraídas de la mina. Los resultados de estas pruebas revelaron una variedad de minerales presentes en la roca. Entre los minerales identificados, se encontraron principalmente aquellos que contienen plomo, plata y zinc. Los minerales predominantes fueron la galena, que es una fuente importante de plomo, y la argentita, conocida por su alto contenido de plata. Además, se detectó la presencia de esfalerita, el principal mineral del cual se extrae el zinc.

Junto a estos minerales, también se identificaron minerales que contienen cobre y hierro. La calcopirita, que es un sulfuro de cobre y hierro, se encontró en cantidades significativas y es una fuente importante de cobre. La pirita también fue detectada.

Además de estos minerales metálicos, se reconocieron minerales no metálicos como el cuarzo, que es un componente común en muchos tipos de rocas y puede influir en el procesamiento del mineral.

Tabla 6: Mineralogía a procesar

Tipo de Mineral	Mineral	Fórmula Química
Sulfuro	Galena	PbS
Sulfuro	Argentita	Ag ₂ S
Sulfuro	Calcopirita	CuFeS ₂
Sulfuro	Pirita	FeS ₂
Sulfuro	Esfalerita	ZnS
Silicato	Cuarzo	SiO ₂
Sulfato	Calcantita	Cu(SO ₄)·5H ₂ O
Carbonato	Calcita	CaCO ₃
Carbonato	Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂
Carbonato	Siderita	FeCO ₃
Silicato	Cuarzo	SiO ₂
óxidos	jarosita	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆



Figura 12: Mineralogía a procesar (Calcantita).



Figura 13: Mineralogía a procesar (Esfalerita, Galena y Argentita).



Figura 14: Mineralogía a procesar (Pirita, Calcopirita)



Figura 15: Mineralogía a procesar (Galena y Cuarzo).

Table 7 Propiedades físicas de los minerales a procesar.

Mineral	Color	Raya	Transparencia	Sistema Cristalino	Dureza	Densidad g/cm ³
Galena	Gris plomo, algo más claro si contiene plata.	Gris plomo	Opaco	Cúbico	2,5-3	7,6
Argentita	Gris a negro	Negro brillante	Opaco	Cúbico	2-2,5	7,2-7,4
Calcopirita	Amarillo-latón, amarillo miel	Negra verdosa	Opaco	Tetragonal	3,5 a 4	4,19
Pirita	Amarillo latón pálido, dorado y gris	negra-marrón	Opaco	Cúbico	6-6,5	4,95-5,10
Esfalerita	Amarilla, anaranjada, marrón, negra	Amarillo pálido a marrón	Opaco	Cúbico	3,5-4	3,9-4,1
Cuarzo	Incoloro o blanco. Otros colores según la variedad.	Blanca	Transparente translúcido	a trigonal y hexagonal	7	4,19
Calcantita	Azul, celeste	Blanca	Translúcido	Triclínico	2,5	2,21
Calcita	Blanco, Variable según impurezas	Blanca	Translúcido	Romboédrico	3	2,7
Dolomita	Grisáceo o negruzco	Blanca	Opaco	Trigonal	3,5 - 4	2,86 - 3,10
Siderita	Pardo, pardo amarillento, gris, gris verdusco	Blanca	Opaco transparente	a Trigonal	3,5-4,5	3,96
Jarosita	Amarillo pardo, rojo óxido	Amarilla	Opaco	Trigonal	2,5 - 3,5	3,1 - 3,3

Los análisis que se realizaron al mineral procesado por ticket de ingreso revelaron que el mineral contenía en mayor porcentaje plata, plomo y Zn. Los análisis revelaron que también que existe un porcentaje de cobre y en pequeñas cantidades oro.

3.4.4.1 Relación entre las propiedades físicas de los minerales y el desgaste de materiales en el proceso de conminución

Las propiedades físicas de los minerales, como dureza, tenacidad, densidad y estructura cristalina, son determinantes en el comportamiento de los materiales durante el proceso de conminución, afectando directamente el desgaste de los equipos utilizados, como molinos y chancadoras. Por ejemplo, el cuarzo, con una dureza de 7 en la escala de Mohs, es uno de los minerales más duros y abrasivos. Su presencia en la matriz mineral puede generar un desgaste acelerado de las placas internas del molino, rayando y erosionando incluso superficies metálicas de alta resistencia, como las fabricadas con acero endurecido. Este tipo de daño aumenta los costos de mantenimiento y reduce la vida útil del equipo.

Desde la perspectiva de un ingeniero de minas, es fundamental no solo identificar la mineralogía del material procesado, sino también evaluar cómo las propiedades físicas de los minerales afectan el diseño y los costos del circuito de molienda. Por ejemplo, el uso de revestimientos específicos, como aleaciones resistentes al desgaste o materiales cerámicos, puede ser una estrategia efectiva para mitigar la abrasión causada por minerales duros como el cuarzo o la pirita (dureza de 6 a 6.5).

Por otro lado, minerales de menor dureza, como la calcita (dureza de 3) y la dolomita (dureza de 3.5 a 4), generan un impacto menor en términos de abrasión, pero pueden influir en otros aspectos del proceso, como la eficiencia energética. Además, minerales como la galena o la esfalerita, debido a su ductilidad y fragilidad, tienden a fracturarse más fácilmente, generando menos fricción, pero afectando la granulometría del producto final. Esto puede requerir ajustes en las etapas posteriores del circuito de molienda para garantizar la uniformidad deseada.

El aporte del ingeniero de minas radica en proponer soluciones integrales que optimicen el proceso. Por ejemplo, mediante un análisis detallado de la composición mineralógica, se puede diseñar un esquema de procesamiento que combine la preclasificación de materiales abrasivos y el ajuste de los parámetros operativos del molino.

3.4.5 Distribución de instalaciones en la planta

La planta cuenta con un área de recepción de mineral, un área de pesado y ensacado, así como también una amplia loza para almacenar mineral.

Además de esto en el área administrativa cuenta con dos oficinas, estacionamiento y dormitorios para su personal.

3.4.5.1 Circuito de chancado y molienda

Es el área donde se procesa el mineral extraído a partir de voladura (gruesos), obteniéndose mineral triturado (fino) y ensacado para su posterior muestreo y análisis.

El circuito de chancado y molienda cuenta con los siguientes equipos:

- ❖ **Tolva de entrada para gruesos.** – Zona de recepción de material grueso, donde 1 operador acomoda las rumas de mineral a través de un mini cargador frontal.
- ❖ **Chancadora de mandíbula.** - Una vez posicionada la ruma de mineral en la tolva, 02 operadores abastecen la chancadora mediante palanas. Es aquí donde el diámetro de la roca es reducido a un rango de 2 a 3 pulgadas.
- ❖ **Faja transportadora N°1.** – Es la faja que recibe el mineral chancado y lo transporta hacia el molino de martillos.
- ❖ **Molino de Martillos.** – Es aquí donde el mineral es triturado mediante un sistema de un eje giratorio con cuatro martillos y una zaranda de 13 mm de diámetro.
- ❖ **Faja transportadora N°2.** – Es la faja que recibe el mineral triturado y lo transporta hacia el área de ensacado.
- ❖ **Zona de ensacado y pesado.** – Es aquí donde el mineral triturado es ensacado y pesado en unidades de 50 kg que son ubicados en pilas para su posterior muestreo.

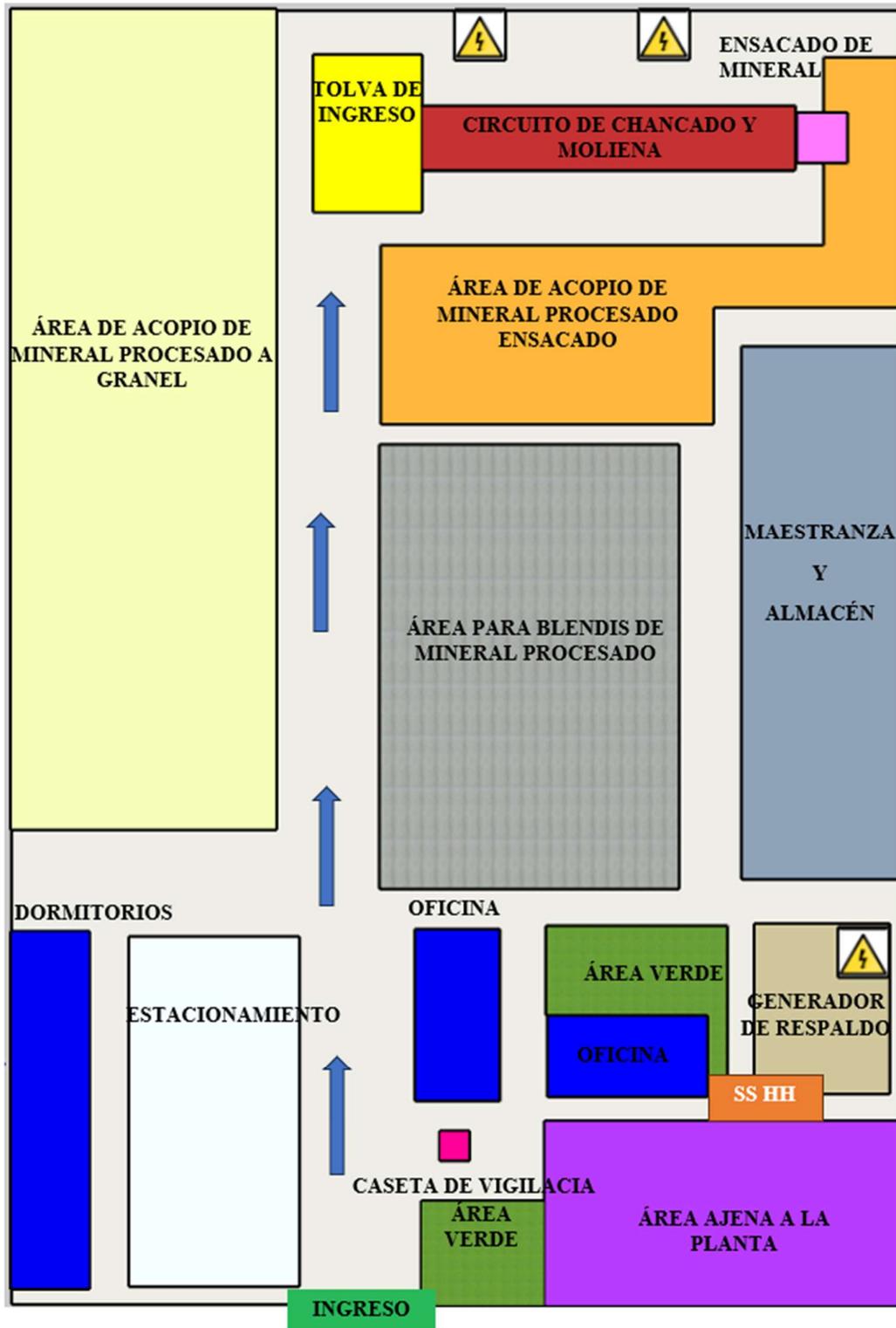


Figura 17: Distribución de áreas en la planta Muki Kutana S.A.C.

Segmento de circuito de interés a analizar

Para nuestro análisis de abastecimiento de mineral se ha definido el segmento de la planta que consta de la faja de transporte 01, el sistema de abastecimiento que conecta la faja con el molino y el molino de martillos.

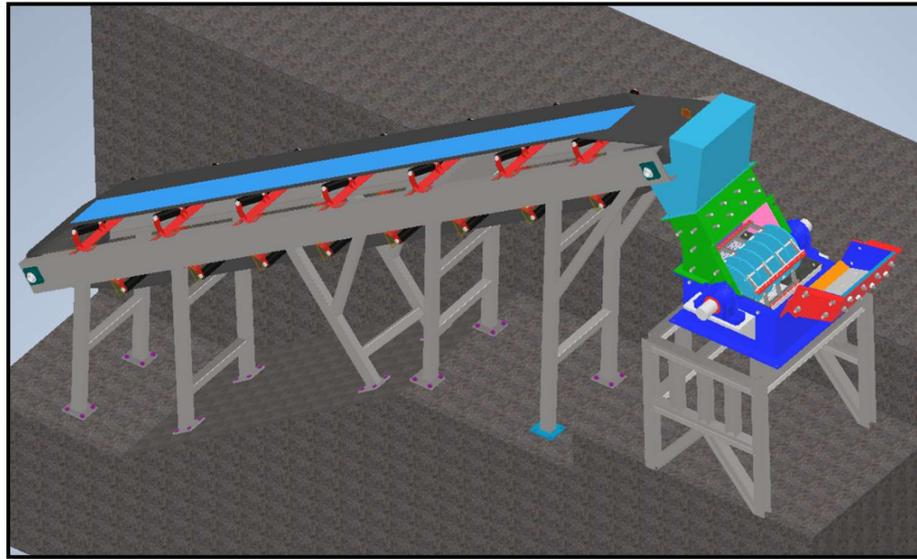


Figura 18: Diseño 3D asistido por el software de Autodesk Inventor



Figura 19: Circuito de molienda de la empresa Muki Kutana S.A.C.

3.4.6 Descripción de molino de martillos

El molino de martillos a estudiar cuenta con un chasis de tres piezas que conforman su estructura principal, una base rectangular de 1000 mm x 835 mm y dos tapas, una fija que permite el ingreso de mineral y otra móvil para permitir el cambio de martillos y zarandas.

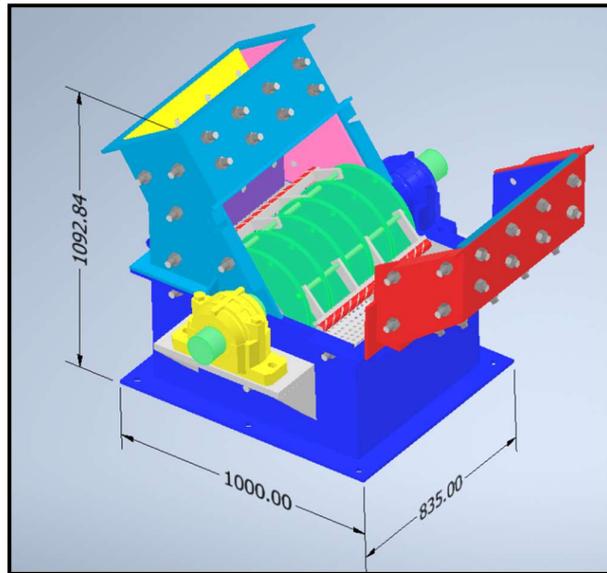


Figura 20: Virtualización de molino de martillos a partir de sus medidas.



Figura 21: Molino de martillos de la empresa Muki Kutana S.A.C.

Conectada a la parte superior del chasis del molino de martillos se encuentra una estructura con forma de embudo, comúnmente denominada “chute”. Esta pieza es fundamental en la operación del molino, ya que facilita la conexión eficiente y segura entre la cinta transportadora N°1 y el molino de martillos. El chute desempeña un papel crucial al guiar el flujo de mineral desde la cinta transportadora hasta el interior del molino, asegurando que el material no se disperse fuera del área designada, lo cual podría generar pérdida de material y problemas de seguridad.

El chute debería estar diseñado para soportar la abrasión constante causada por el mineral que choca contra sus paredes durante su descenso hacia el molino. Este diseño debe contar con superficies internas que minimizan el desgaste y reducen el riesgo de acumulación de material, lo que podría obstruir el flujo. Además, su geometría optimizada ayuda a controlar la velocidad y la dirección del mineral, garantizando una entrada uniforme y continua al molino de martillos.

La interacción del mineral con las paredes del chute antes de alcanzar la zona de impacto con los martillos es un factor crítico que debe ser considerado. Este choque inicial ayuda a desacelerar el material y a distribuirlo de manera más homogénea antes de ser triturado. Sin embargo, también implica que el chute debe estar fabricado con materiales resistentes al desgaste y posiblemente recubierto con revestimientos especiales para prolongar su vida útil. El mantenimiento regular del chute es esencial para asegurar su funcionamiento óptimo. Esto incluye inspecciones periódicas para detectar y reparar cualquier daño o desgaste, así como la limpieza para evitar la acumulación de material que podría afectar la eficiencia del proceso. Además, el diseño del chute debe permitir un fácil acceso para estas tareas de mantenimiento sin interrumpir significativamente las operaciones del molino.

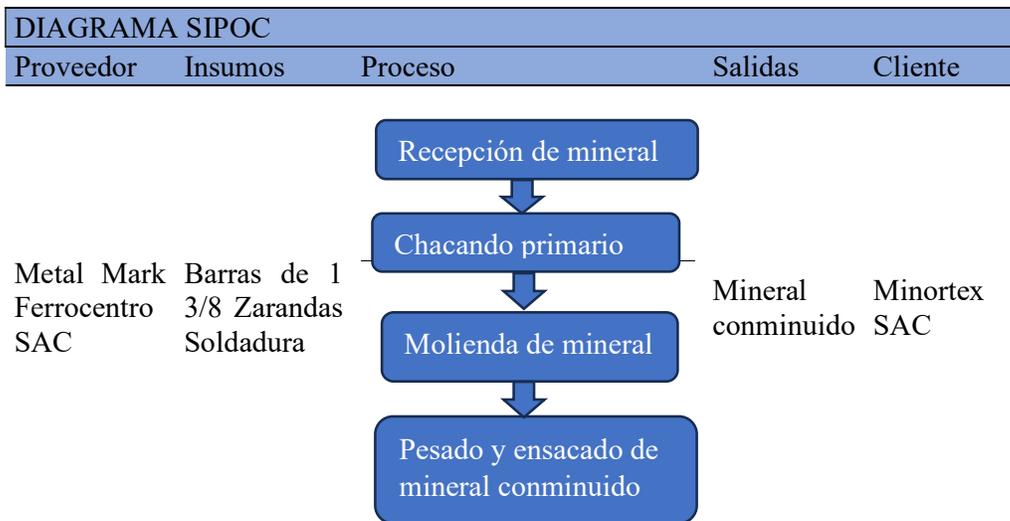
3.4.7 Análisis y diagnóstico del proceso de conminución de minerales

Para este análisis utilizaremos las herramientas SIPOC para definir los elementos del proceso y el diagrama de ISHIKAWA para identificar la causa raíz del problema en el proceso de molienda, finalmente se obtendrá el diagnóstico.

3.4.7.1 Proceso realizado en el circuito de chancado y molienda

Para analizar este proceso será necesario definir los elementos que interactúan en el proceso, para este caso utilizamos el SIPOC.

Tabla 8: Diagrama SIPOC aplicado al proceso de conminución de minerales de la empresa Muki Kutana S.A.C



- a. **Recepción de mineral:** El portero recibe los documentos del mineral a ser procesado como son la guía de remisión, la guía de transportista y el ticket de balanza con el tonelaje a procesar. Si todo está conforme se ubica el mineral en la tolva de la planta para ser procesado.
- b. **Chancado primario:** El líder de la cuadrilla arranca la planta y los operarios comienzan a verter el material en la chancadora primaria para reducir el diámetro de las rocas a un tamaño menor a 3 pulgadas.
- c. **Molienda de mineral:** El mineral chancado es recibido por la faja de transporte N°1 y transportado hacia el molino de martillos, el cual recibe el mineral a través de un sistema de abastecimiento (chute) que evita que el mineral termine fuera del circuito.
- d. **Pesado y ensacado:** Luego de que el mineral ha sido triturado es transportado por la faja de transporte N° 2 para ser ensacado y pesado en unidades de 50Kg. Estos sacos son arrumados de tal manera que facilite su muestro.

3.4.8 Análisis del proceso de molienda

Dentro de este proceso se han identificado problemas los cuales se mencionan en el siguiente cuadro.

Tabla 9: Problemas identificados durante el proceso de conminución de minerales

Operación	Problemas encontrados
	La frecuencia con la que se realizan los cambios de martillos por desgaste es alta y ocasiona mayor cantidad de paradas de planta.
Molienda de mineral	<p>La granulometría del resultado se ve afectado cuando los martillos están desgastados y los clientes presentan quejas</p> <p>La forma en la que se desgastan los martillos no es uniforme</p>

Después de analizar los problemas asociados con la etapa de molienda en el molino de martillos, se pueden plantear las siguientes observaciones y consideraciones:

- 1. Paradas de Planta para el Cambio de Martillos:** Las paradas de planta necesarias para realizar el cambio de martillos ocurren dos veces por cada juego de martillos. La primera parada se realiza para reemplazar los martillos completamente desgastados con unos nuevos. La segunda parada se lleva a cabo para voltear los martillos, con el objetivo de asegurar un desgaste uniforme en ambas caras. Sin embargo, se ha observado que los martillos presentan un mayor desgaste en la zona central, mientras que el desgaste en los laterales es significativamente menor. Este patrón de desgaste indica que el desgaste central es el factor determinante que obliga a realizar el cambio de los martillos, ya que alcanza niveles críticos antes que los laterales.
- 2. Impacto del Desgaste en la Granulometría:** La granulometría del material molido está directamente influenciada por la distancia entre los martillos y las placas internas del molino, así como por la distancia entre los martillos y las zarandas. A medida que los martillos se desgastan en la parte central, se incrementa la distancia entre estos y las placas internas, así como con las zarandas. Este aumento en las distancias resulta en una molienda más gruesa, ya que el material no se reduce al tamaño deseado de manera eficiente. Por lo tanto, el desgaste desigual de los martillos afecta negativamente la calidad del producto final.
- 3. Enfoque del Análisis:** Teniendo en cuenta los problemas identificados, se centrará el análisis en la forma en que se están desgastando los martillos. Es fundamental entender las causas subyacentes del desgaste desigual para implementar soluciones efectivas que optimicen la operación del molino. Esto podría incluir la revisión del diseño del molino, la

distribución del material dentro del molino, los procedimientos operativos, y el material de fabricación de los martillos.

En resumen, el análisis detallado se enfocará en investigar y mitigar las causas del desgaste desigual de los martillos en el molino de martillos. Al abordar estos problemas, se espera reducir las paradas de planta, mejorar la uniformidad del desgaste de los martillos y, consecuentemente, asegurar una granulometría más consistente y de mejor calidad en el producto molido.

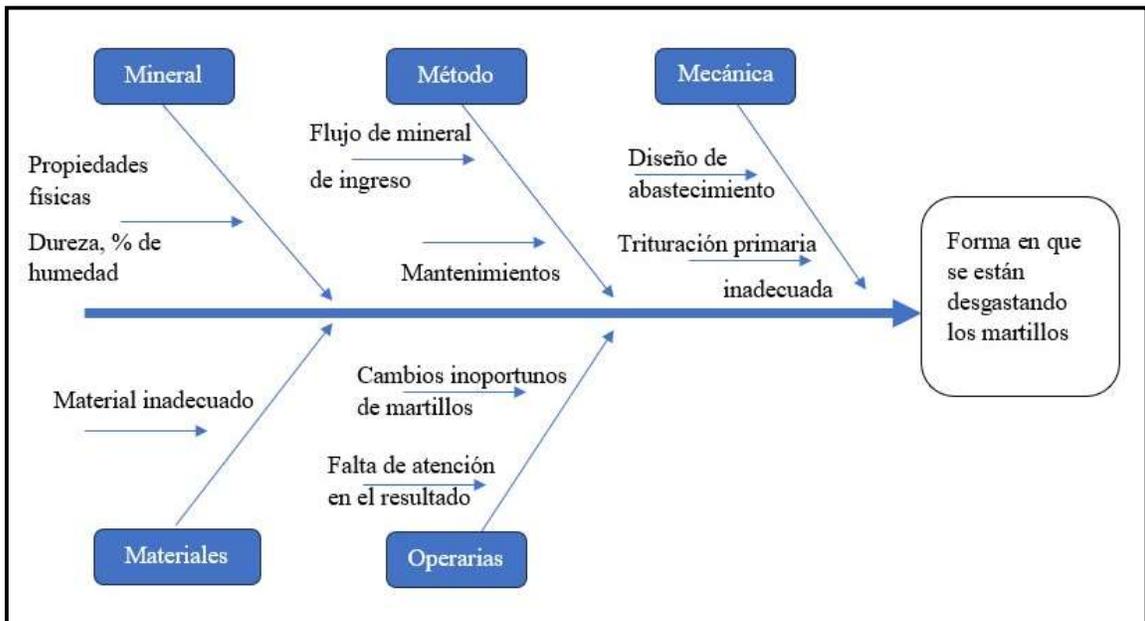
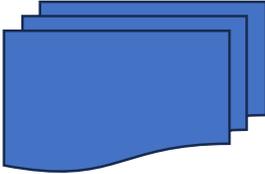
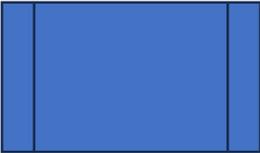
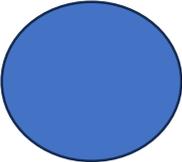
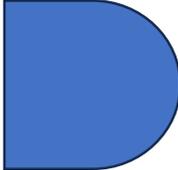


Figura 22: Análisis de los problemas utilizando el diagrama de ISHIKAWA

Tabla 10 Simbología para diagramas de flujo.

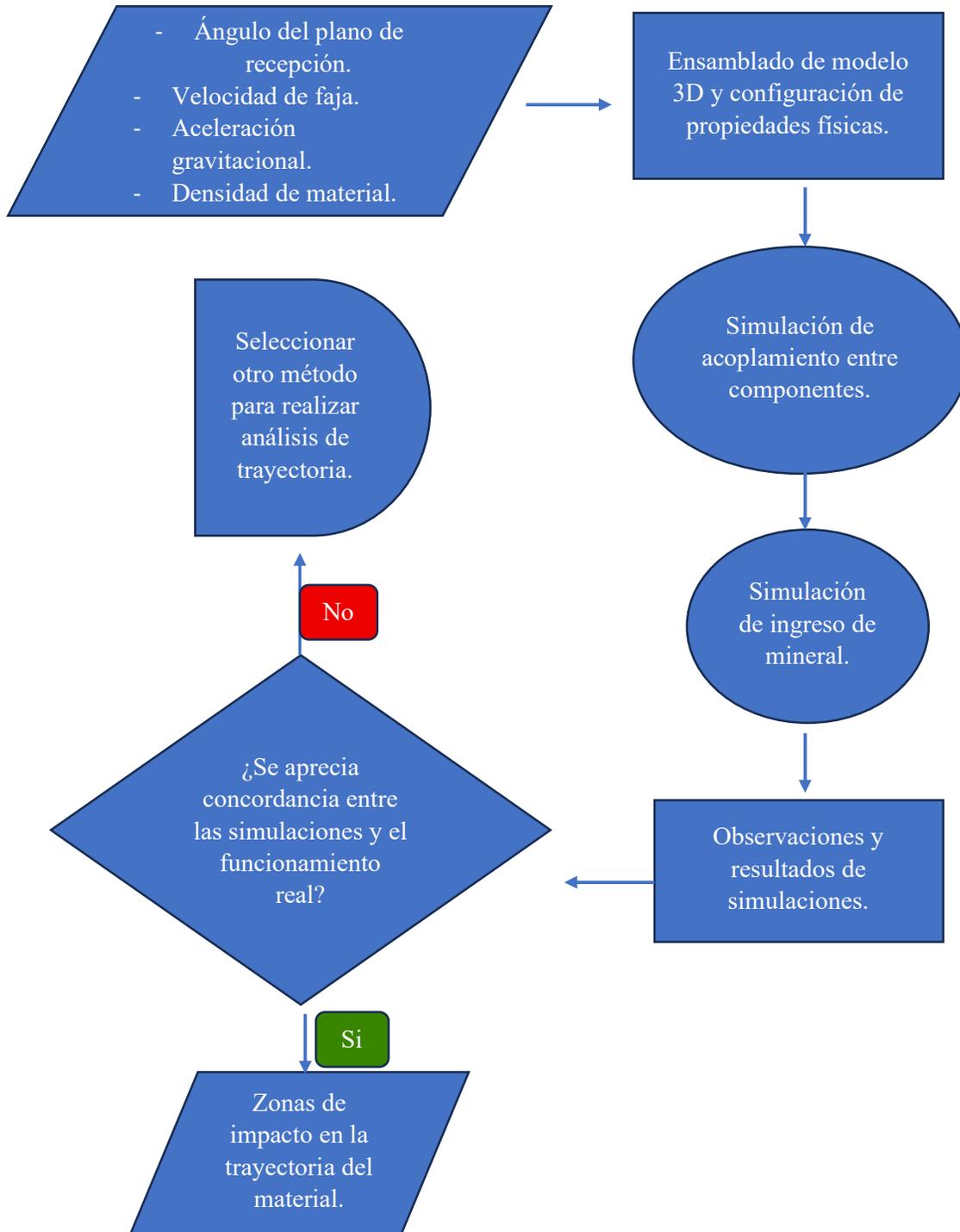
SIMBOLO	SIGNIFICADO	SIMBOLO	SIGNIFICADO
	Multidocumento: Refiere al conjunto de documentos. Por ejemplo, para este caso los archivos generados por el programa Inventor.		Entrada / Salida: Representa la lectura de datos en la entrada y la impresión de datos en la salida
	Terminal: Indica el inicio o la terminación del flujo en un proceso.		Operación manual: Trabajos realizados en campo.
	Proceso Predefinido: Indica un proceso que esta especificado en otro lugar.		Línea de flujo: Representa el orden de operación de los procesos.
	Proceso: Representa una instrucción que origina un cambio de valor.		Decisión: Proceso para verificar si se cumple una condición.
	Inspección: Conector de procesos para tareas que requieren supervisión.		Retardo: Significa que pasará un tiempo antes de que el proceso continúe.

3.4.8.1 Diagrama de flujo a seguir para el análisis del circuito de conminución de minerales.



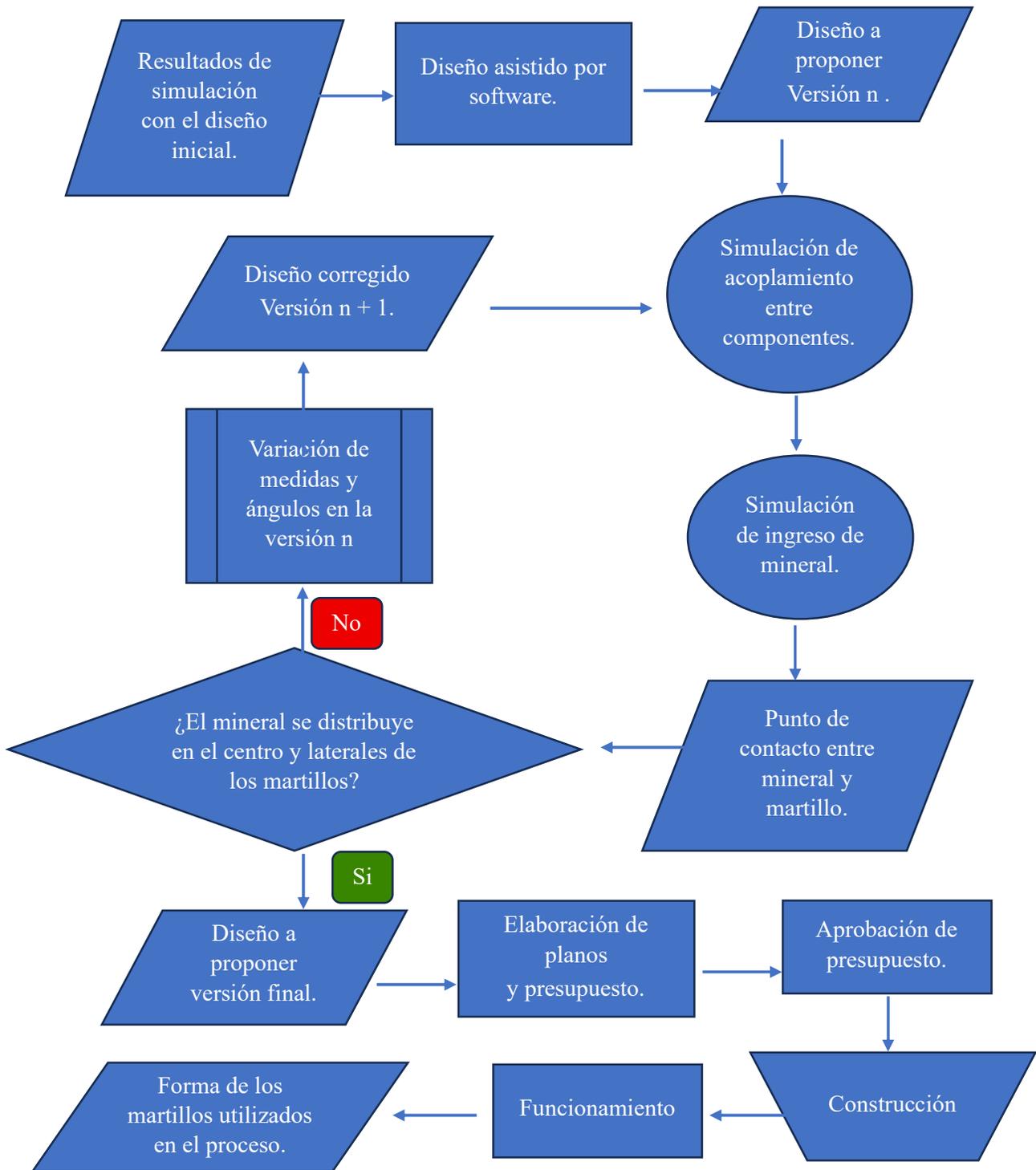
Gráfica 1: Diagrama de flujo utilizado para expresar el proceso de análisis.

3.4.8.2 Diagrama de flujo para el análisis del proceso de abastecimiento con el funcionamiento del diseño inicial.



Gráfica 2: Diagrama de flujo para el análisis del proceso de abastecimiento con el funcionamiento del diseño inicial.

3.4.8.3 Diagrama de flujo para el análisis del proceso de abastecimiento con el funcionamiento del diseño final.



Gráfica 3: Diagrama de flujo para el análisis del proceso de abastecimiento con el funcionamiento del diseño final.

3.4.9 Análisis de distancia entre martillos y placa del molino en la zona de trituración de minerales.

Esta distancia hace referencia al espacio libre entre los martillos y las placas de la zona de trituración, si la distancia es muy grande pueden atravesar partículas sin entrar en contacto con los martillos, sabiendo que la zaranda tiene orificios de 13 mm de diámetro. Si la distancia es muy corta cuando el molino esté en funcionamiento la deformación de los martillos por la fuerza centrífuga ocasionara que los martillos choquen con las placas internas del molino evitando que este triture el material.

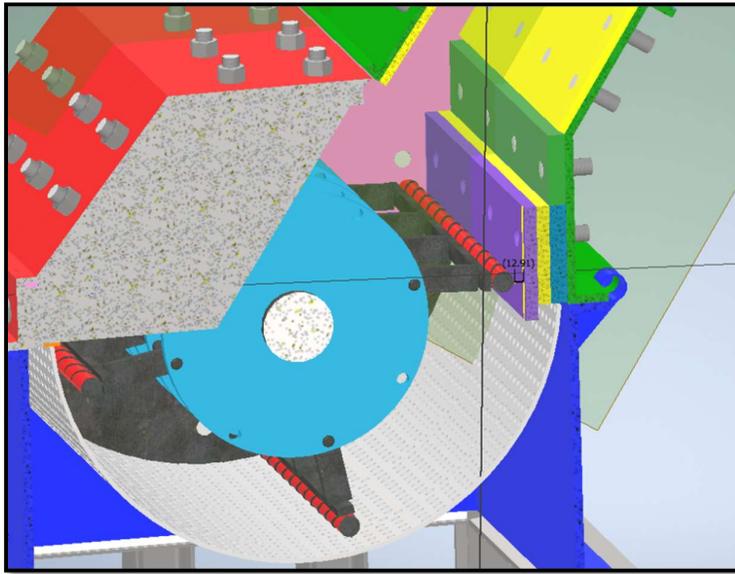


Figura 16: Vista interior de distancia entre martillos y placa de molino en la zona de trituración.

Cálculo de la fuerza centrífuga a la que son sometidos los martillos por la rotación del eje.

$$F_{cent} = \frac{m * v^2}{r}$$

Donde:

m: masa

v: velocidad lineal

r: radio

Considerando las revoluciones del motor de 50 HP y el sistema de poleas se obtuvo de campo que el molino funciona con 2900 revoluciones por minuto con un radio de 333 mm.

$$Velocidad\ lineal = Velocidad\ angular * radio$$

$$Velocidad\ lineal = 2900 \frac{rev}{min} * \frac{2\pi}{rev} * \frac{1min}{60\ seg} * 0.333\ m$$

$$Velocidad\ lineal = 101.1\ m/s$$

Conociendo que la masa promedio de los martillos es 9,5 kg podemos reemplazar en la ecuación para calcular la fuerza centrífuga.

$$F_{cent} = 9.5\ kg * \frac{(101.1\ m/s)^2}{0.333\ m}$$

$$F_{cent} = 291596.1\ N$$

Este valor será utilizado para realizar un estudio de esfuerzo mediante el software de Inventor de Autodesk. Creamos y configuramos el estudio con el resultado obtenido para la fuerza centrífuga.

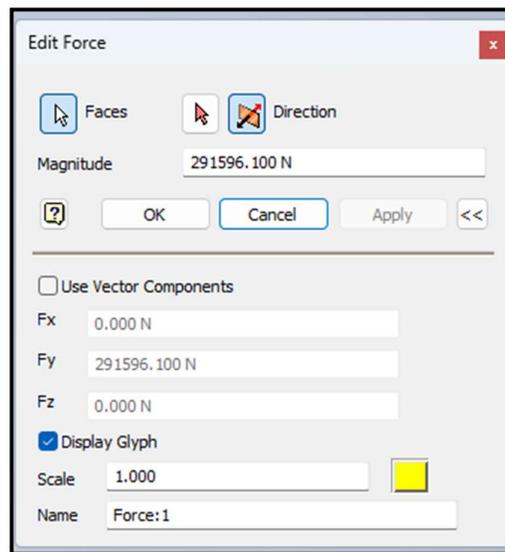


Figura 17: Ingreso de valor para la fuerza centrífuga en la interfaz del software de Autodesk Inventor.

Como se puede observar en la Figura 18, el martillo sufre deformación por la fuerza centrífuga, es importante tener en cuenta esto a la hora de seleccionar el espesor de la placa en la zona de trituración pues si es mayor a ½ pulgada los martillos chocarían con la placa al ponerse en funcionamiento. En la leyenda se puede apreciar el desplazamiento que sufre por la deformación en mm.

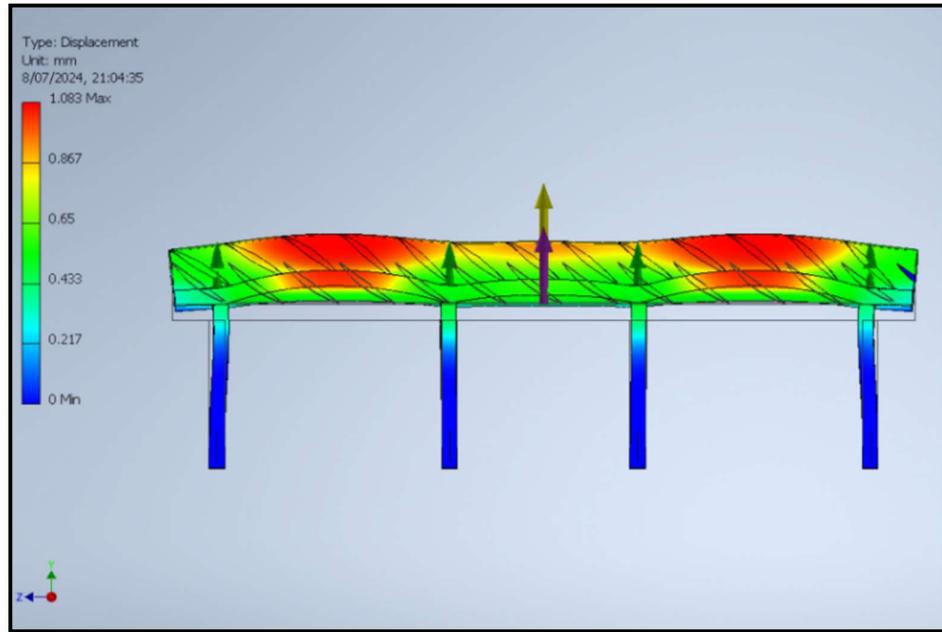


Figura 18: Análisis de deformación de martillo por fuerza centrífuga.

3.4.10 Diseño inicial de pieza de abastecimiento

El diseño inicial de la pieza de abastecimiento está construido en su mayor parte con plancha metálica de 1/16 pulgadas de espesor y su base con plancha metálica de espesor 1/8 pulgadas siendo sus medidas en mm las siguientes:

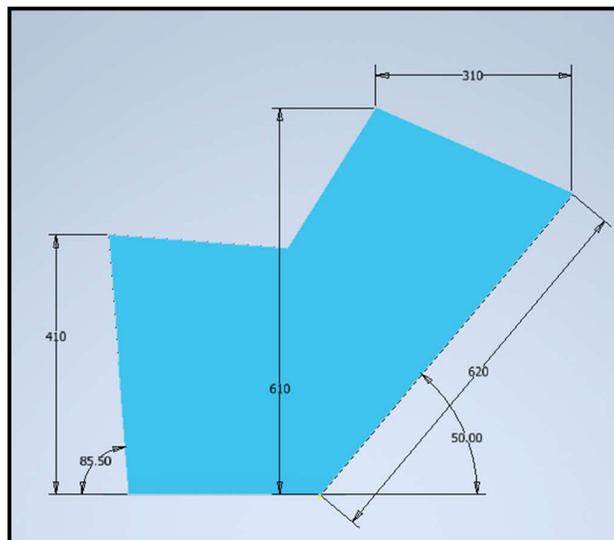


Figura 19: Vista de perfil del primer diseño de abastecimiento.

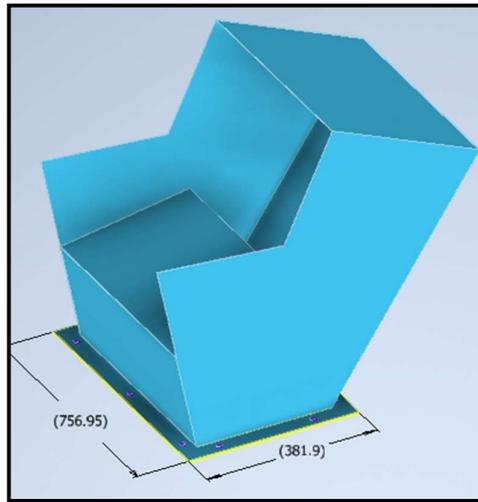


Figura 20: Vista Isométrica del primer diseño de abastecimiento.

3.4.11. Vista de acoplamiento con el molino de martillos

Con asistencia del software Inventor de Autodesk y sus herramientas de ensamblado podemos simular el acoplamiento de los componentes de nuestro interés con el fin de mostrar un modelo 3D que nos permita ser más eficientes en el diseño y análisis de su comportamiento con los demás componentes. En este caso estamos simulando el acoplamiento entre el molino de martillos, la faja de transporte y el diseño inicial de la pieza de abastecimiento que los conecta.



Figura 21: Vista de acoplamiento real para el primer diseño.

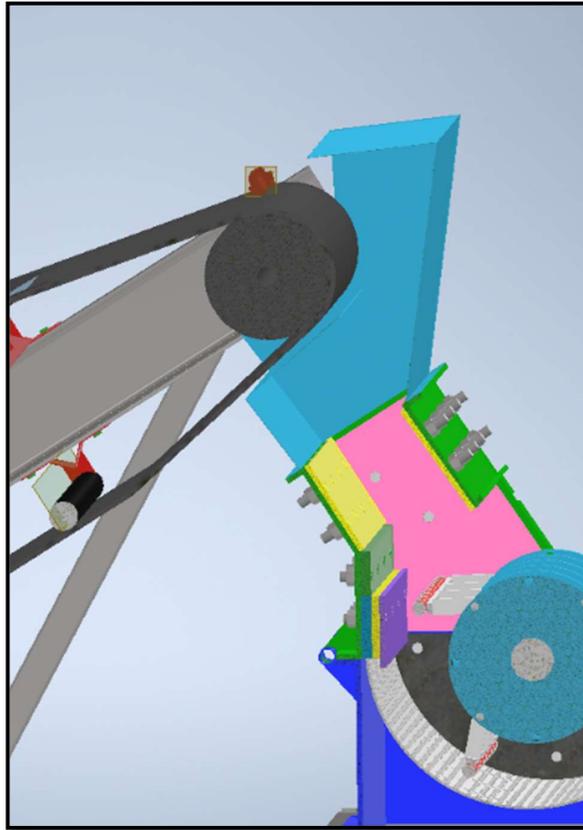


Figura 22: Vista de acoplamiento para el primer diseño en el modelo virtual.

3.4.12 Configuración de propiedades físicas de la pieza de abastecimiento con el diseño inicial a través del software Inventor de Autodesk.

Entre las características del software Inventor existe una que nos permite configurar las propiedades físicas de nuestra pieza de abastecimiento como el material del que estará construido, esto gracias a las librerías de Autodesk. Una vez seleccionado el material que para este caso es acero el software actualizará las propiedades físicas como masa, densidad, centro de gravedad, etc. La finalidad de realizar esta configuración es que posteriormente mediante otras funcionalidades se ejecutara una simulación dinámica que nos permita analizar el funcionamiento de nuestro diseño.

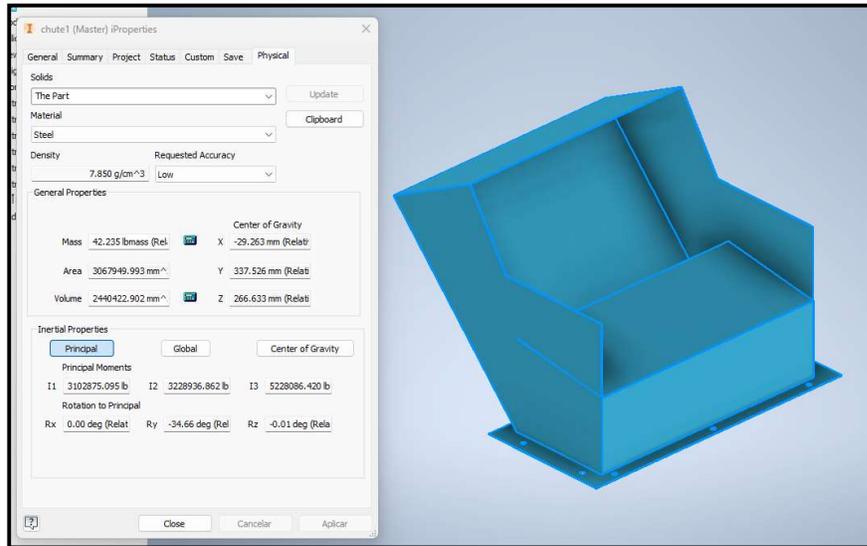


Figura 23: Configuración de propiedades físicas para el modelo virtual del primer diseño de abastecimiento.

3.4.13 Simulación de Abastecimiento con el diseño inicial a través del software Inventor de Autodesk.

Para poder realizar la simulación de una caída de roca a través del diseño inicial de abastecimiento utilizaremos el entorno de simulación dinámica del software Inventor de Autodesk, mediante su interfaz de configuración agregaremos el valor de la aceleración para la gravedad, así como la dirección en la que deberá efectuarse.

Considerando que la roca previa a caer, no solo está siendo afectada por la gravedad sino también por la fuerza de la faja de transporte que se mueve a una velocidad de 0.52 m/s lo cual ocasiona un movimiento parabólico. El cual también es parte de la simulación.

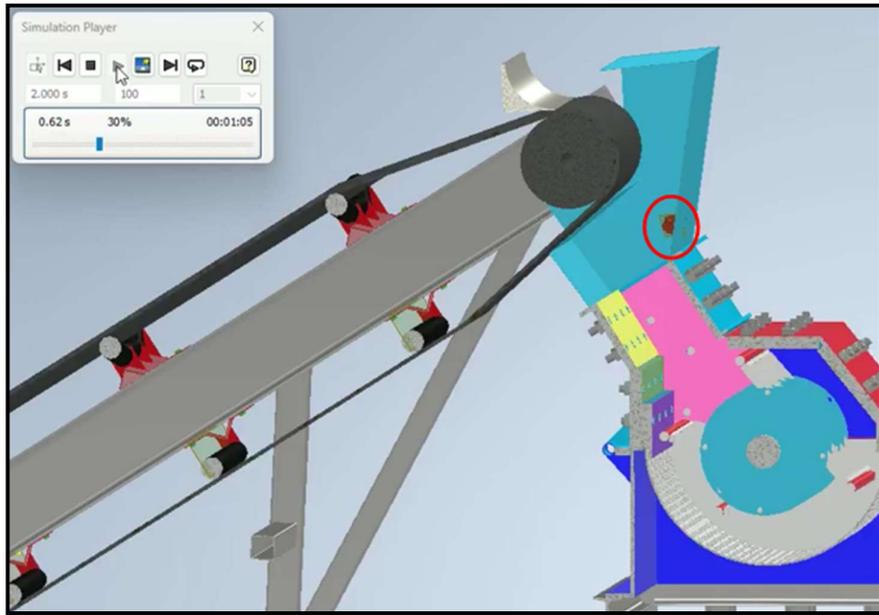


Figura 24: Simulación de trayectoria, primer impacto con la pieza de abastecimiento.

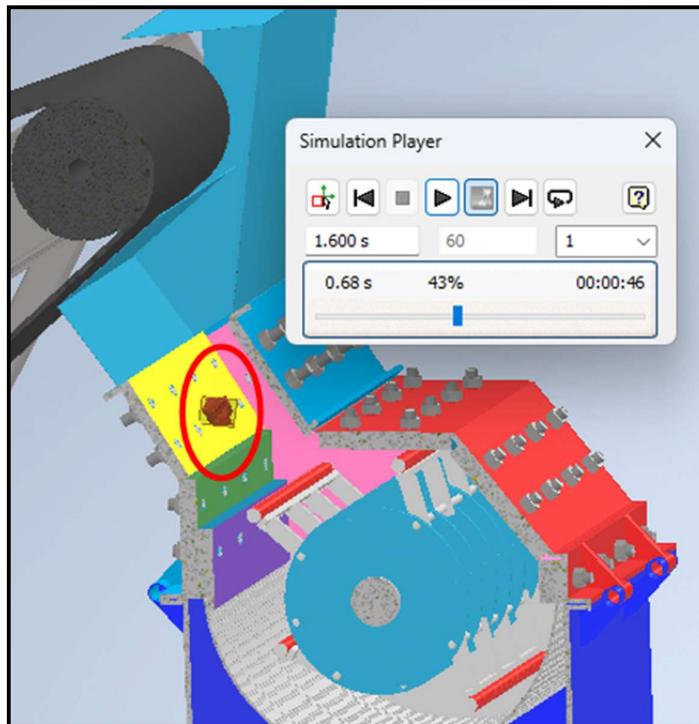


Figura 25: Simulación de trayectoria, segundo impacto con las placas internas del molino de martillos.

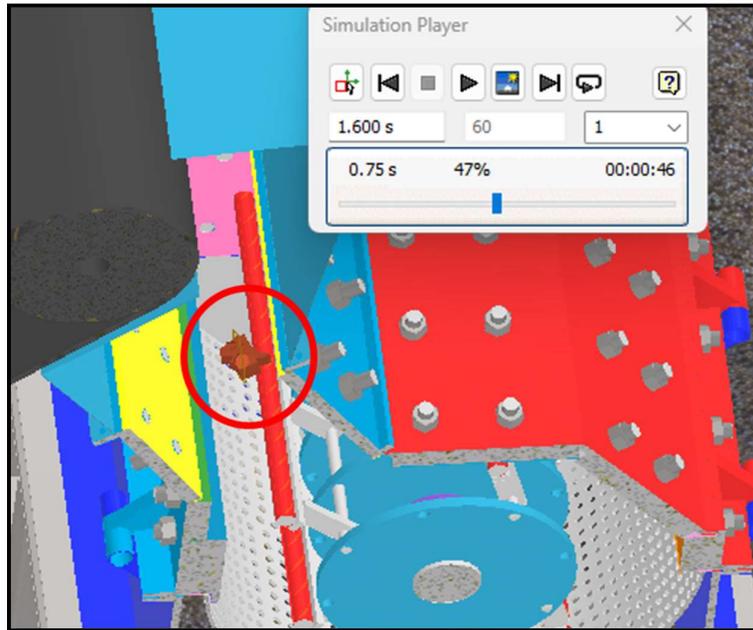


Figura 26: Simulación de trayectoria, tercer impacto en la parte central del martillo.

3.4.14 Problemas relacionados al funcionamiento del diseño inicial

- El espesor del material con el que está construido no es el adecuado puesto que en el área donde impactan los clastos angulares se genera un efecto abrasivo en la placa de metal hasta llegar a la rotura, lo que significa que no se puede seguir moliendo hasta realizar la reparación de esta fuga.
- El ángulo de 50 grados que forma el plano en que impacta el mineral con la base de la pieza puesto que permite que después de impactar la roca con la placa metálica su dirección sea hacia la zona central de los martillos en donde su primer impacto es solamente con el martillo y no con las placas del molino.



Figura 27: Rotura por efecto abrasivo de los impactos del mineral.

3.4.14.1 Observación en el deterioro de martillos

El deterioro de los martillos es más notorio en la parte central donde ha sobrepasado la cantidad de masa y volumen útil para moler adecuadamente. Este espacio permite libre deja un vacío entre el martillo y la zaranda, lo que ocasiona que el material más grueso pueda pasar mientras que los laterales del martillo se notan con poco desgaste por lo que se deduce que no se está aprovechando adecuadamente en el proceso de conmiución



Figura 28: Martillo utilizado en el proceso de conmiución de minerales con el diseño de abastecimiento inicial (Mayor desgaste en el centro).

3.4.15 Variación de masa en los martillos por deterioro obtenido de moliendas realizadas con el diseño inicial

Se tomaron los siguientes datos de moliendas realizadas utilizando el diseño inicial de abastecimiento, donde se detalla la masa que pierde cada juego de martillos y el tonelaje que se llega a procesar.

Tabla 11: Medición de masa de los martillos antes y después del proceso de conminución de minerales con el diseño inicial.

Juego de martillos	Martillos	Masa inicial (Kg)	Masa promedio (Kg)	Masa final (Kg)	diferencia entre masa inicial y masa final (kg)	masa perdida/ y juego de martillo (kg)	tonelaje procesado (ton)
Juego 01	martillo_01	9.1	6.32	6.84	2.14	8.64	12.45
	martillo_02	8.87	6.32	6.64	2.34		
	martillo_03	8.77	6.32	7.27	1.71		
	martillo_04	9.16	6.32	6.52	2.46		
Juego 02	martillo_05	8.97	6.73	7.54	1.48	6.74	11.6
	martillo_06	9.09	6.73	7.38	1.64		
	martillo_07	9.14	6.73	7.20	1.82		
	martillo_08	8.87	6.73	7.22	1.80		
Juego 03	martillo_09	9.2	6.74	7.20	2.07	6.49	11.9
	martillo_10	9.32	6.74	7.85	1.43		
	martillo_11	9.17	6.74	7.88	1.40		
	martillo_12	9.4	6.74	7.68	1.60		
Juego 04	martillo_13	8.4	6.71	6.99	1.60	6.36	12.27
	martillo_14	8.75	6.71	7.03	1.56		
	martillo_15	8.82	6.71	7.08	1.51		
	martillo_16	8.37	6.71	6.90	1.69		
Juego 05	martillo_17	8.69	6.48	7.34	1.48	7.18	11.15
	martillo_18	8.75	6.48	6.81	2.01		
	martillo_19	8.81	6.48	7.27	1.55		
	martillo_20	9.03	6.48	6.68	2.14		
Juego 06	martillo_21	9.11	3.58	7.56	1.55	7.99	12.8
	martillo_22	9.05	3.58	6.84	2.27		
	martillo_23	9.54	3.58	7.14	1.97		
	martillo_24	8.72	3.58	6.89	2.22		

Con seis juegos de martillos se procesó 72,17 Tn de mineral. Cada juego de martillos perdió 7.23 kg en promedio durante el proceso de conminución.

Como parte del procedimiento tendremos en cuenta el siguiente gráfico que relaciona el tonelaje procedo por cada juego de martillos.

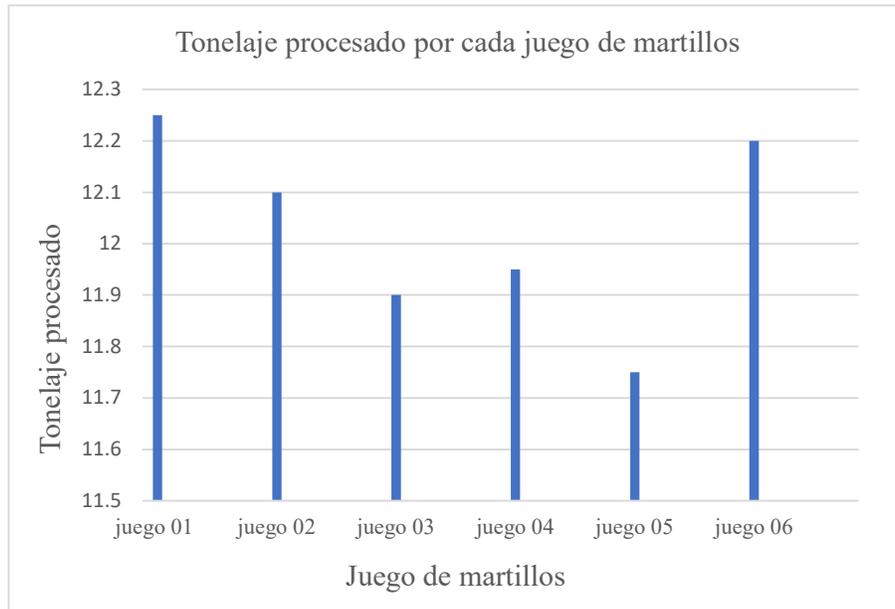
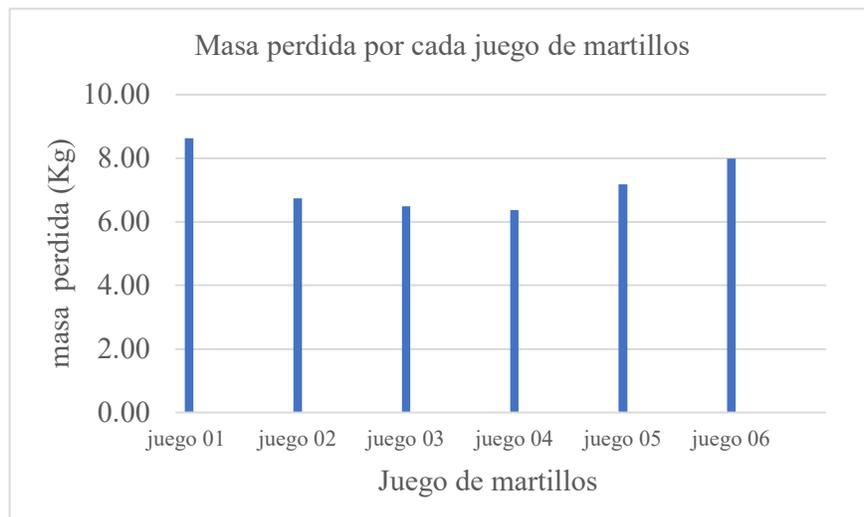


Gráfico 4: Tonelaje procesado por cada juego de martillos.

También en base al registro de molienda tenemos el siguiente gráfico que indica la cantidad de masa perdida por cada juego de martillos durante el proceso de conminución.



Gráfica 5: Masa perdida por cada juego de martillos durante el proceso de conminución de mineral.

Tomaremos en cuenta también la masa perdida por cada martillo durante el proceso de conminución y la graficaremos.

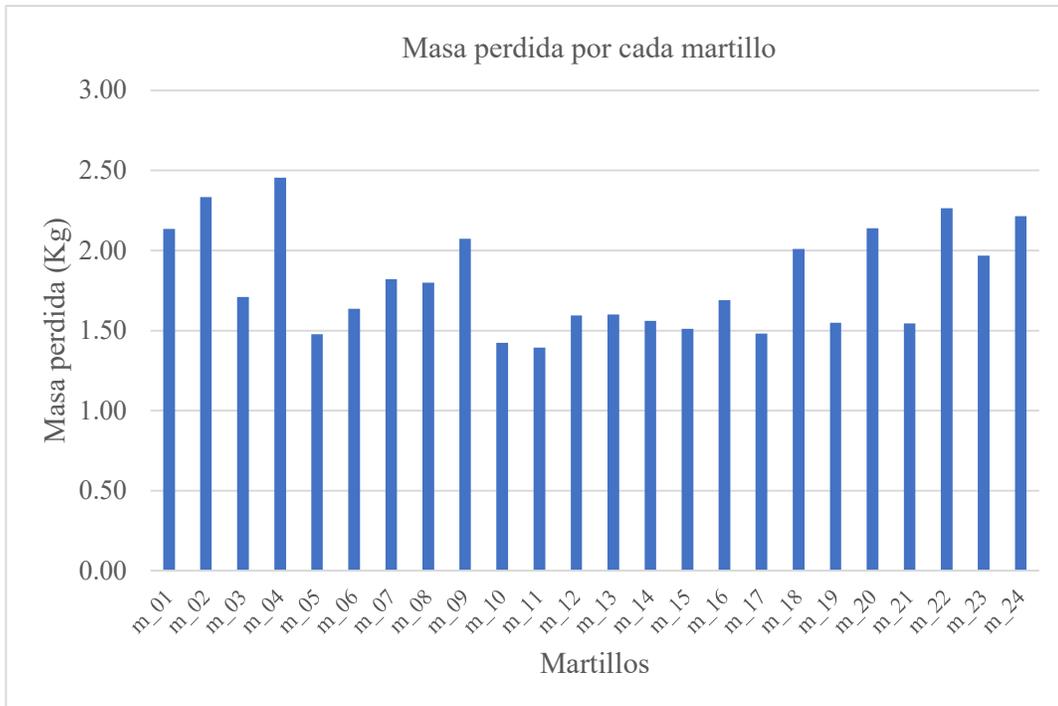


Gráfico 6: Masa perdida por cada martillo durante el proceso de conminución de mineral.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Propuesta de diseño de abastecimiento

Con las observaciones realizadas y teniendo en cuenta que nuestro objetivo es distribuir el mineral para un desgaste uniforme en los martillos se presenta el nuevo diseño con las siguientes características:

- El material de construcción a utilizar será plancha metálica de 3/16 pulgadas.
- El ángulo del plano donde se recibe el primer impacto de mineral se modificó de 50 grados a 58 grados.
- Se adiciono una placa de ½ pulgada de espesor para mayor resistencia antes de llegar a la rotura por el efecto abrasivo que generan las rocas en su recorrido.
- Estará conformado por dos cuerpos, se adiciono un cuerpo extra en la parte superior con la finalidad de conectar un extractor de polvo a futuro.

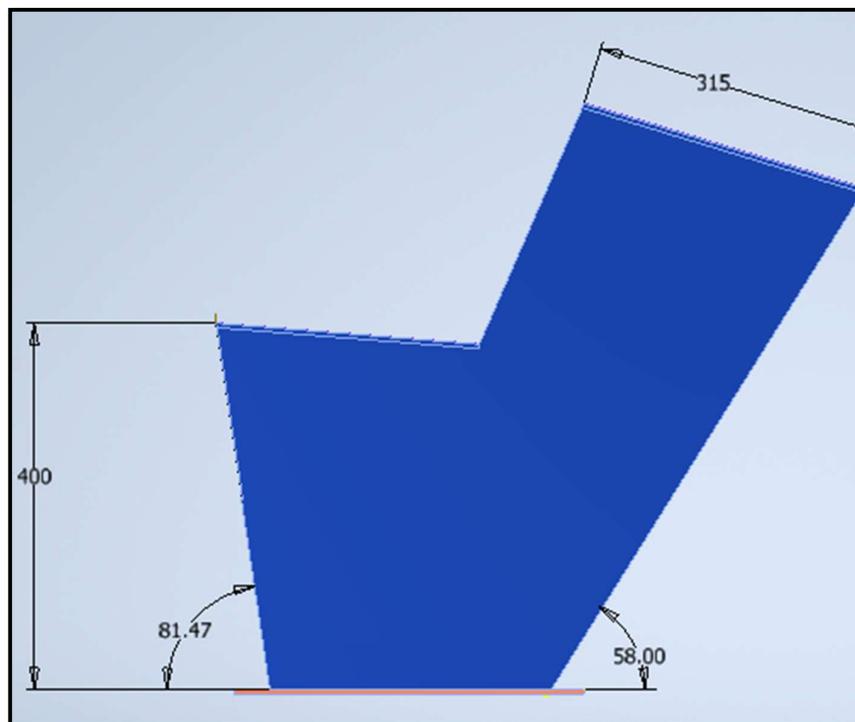


Figura 29: Vista de perfil del diseño a proponer.

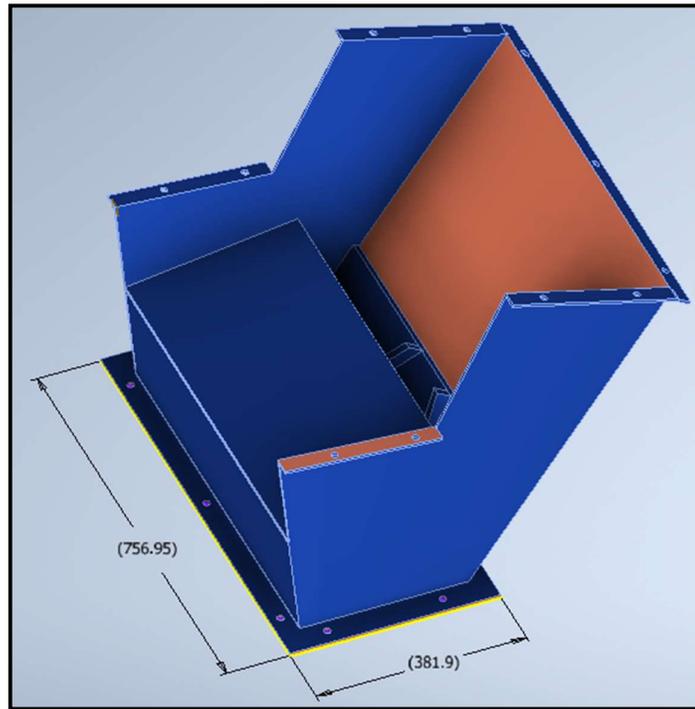


Figura 31: Vista isométrica del diseño a proponer.

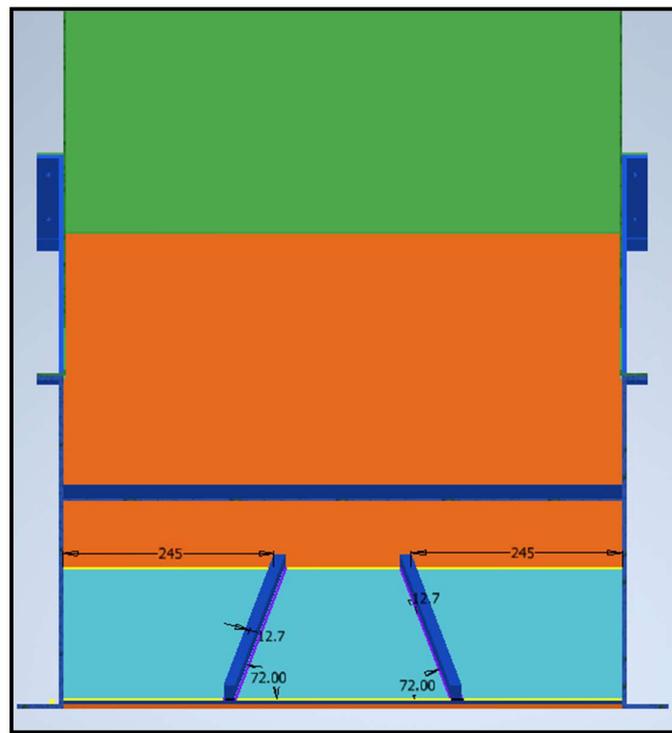


Figura 30: Vista frontal de la sección de distribución en el diseño a proponer.

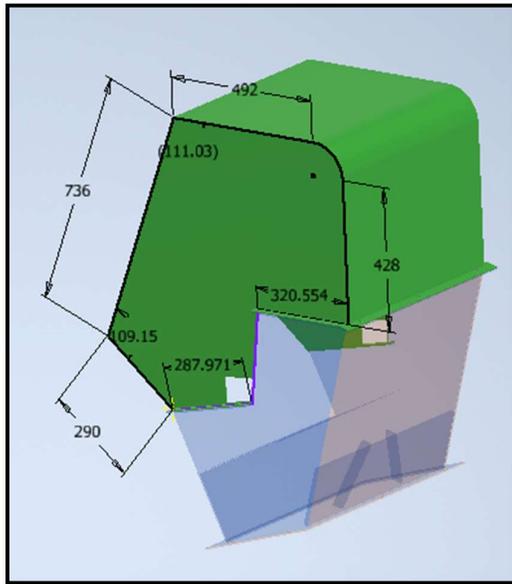


Figura 32: Vista de acoplamiento con la segunda parte del diseño a proponer.

4.2 Simulación de acoplamiento con el molino y la faja de transporte

Utilizando la herramienta de ensamblaje del software Inventor podemos visualizar una simulación de como resultaría el nuevo diseño junto con la faja de transporte y el molino de martillos.

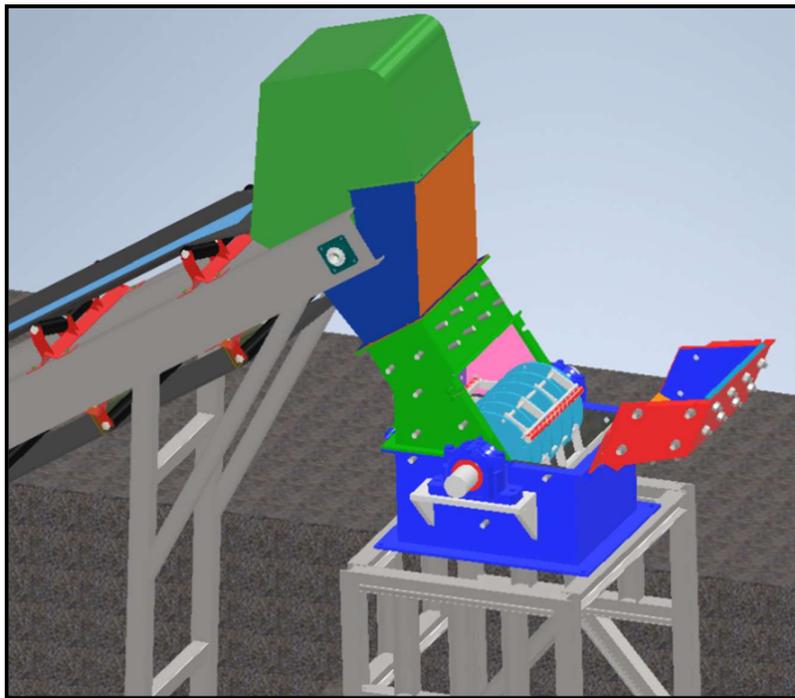


Figura 33: Simulación de acoplamiento para el modelo virtual del diseño propuesto.

4.3 Simulación de Abastecimiento con el diseño propuesto

La simulación del nuevo diseño de abastecimiento se realizó utilizando el entorno de simulación dinámica del software Inventor de Autodesk, de manera similar a la simulación efectuada con el primer diseño. En este entorno, se configuraron las condiciones físicas del sistema, agregando el valor de la aceleración para la gravedad a través de la interfaz de configuración, con el fin de replicar las condiciones reales en las que operará el equipo.

El nuevo diseño de abastecimiento se sometió a pruebas utilizando dos partículas que representan el mineral, lo que permitió observar la trayectoria y la distribución del material dentro del sistema propuesto. La simulación buscaba identificar cómo se comporta el flujo de mineral y evaluar si el rediseño logra mejorar la distribución sobre los martillos del molino. Durante la simulación, se prestó especial atención a cómo las partículas interactúan con las distintas partes del sistema, verificando si el flujo del mineral se distribuye de manera más uniforme en las áreas laterales de los martillos, lo que permitiría reducir el desgaste excesivo en la parte central. Esto proporcionó una primera evaluación visual y cuantitativa de la efectividad del nuevo diseño. Finalmente, los resultados de la simulación serán comparados con los del diseño inicial, lo que permitirá validar si las modificaciones propuestas logran el objetivo de prolongar la vida útil de los martillos y mejorar la eficiencia del proceso de conminución.

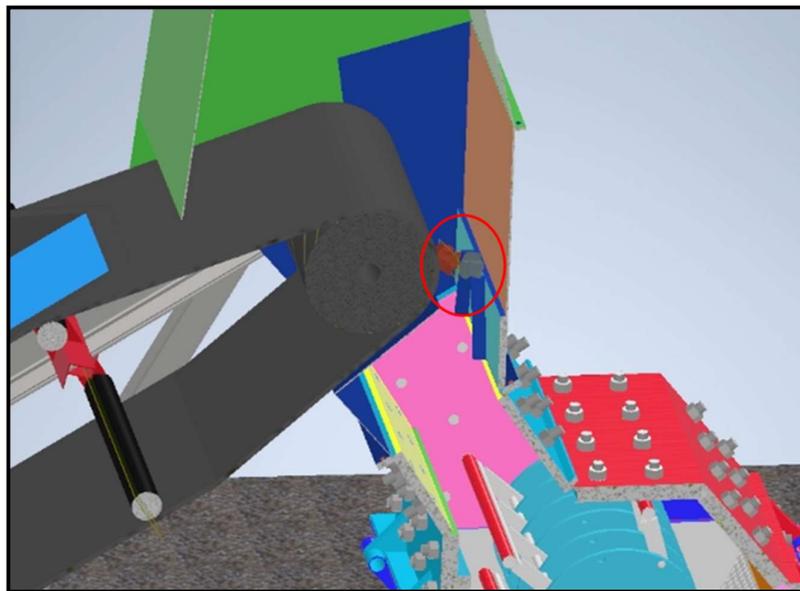


Figura 34: Simulación de trayectoria, segundo impacto con las placas internas del molino de martillos.

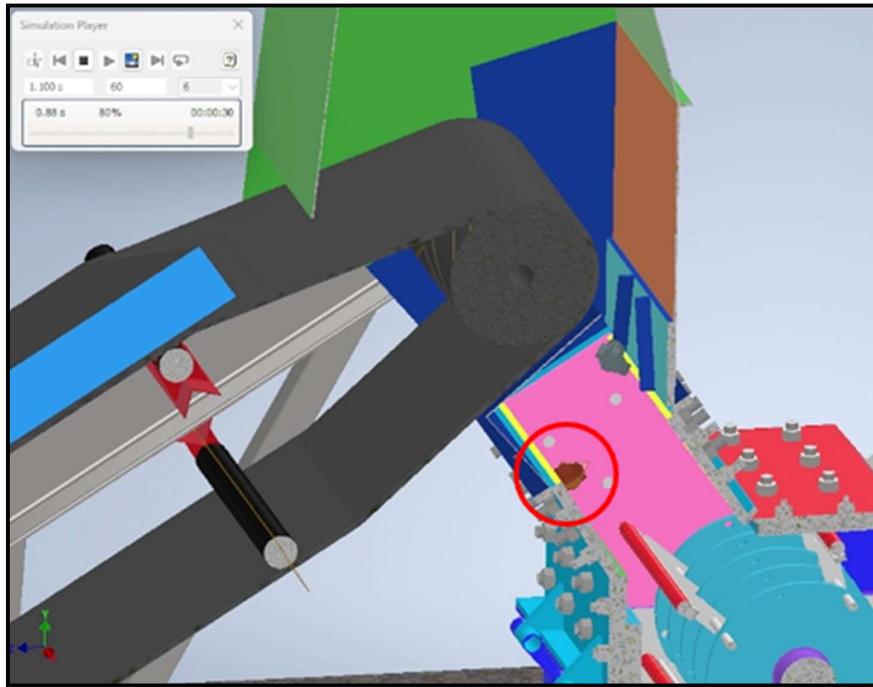


Figura 35: Simulación de trayectoria, primer impacto con la pieza de abastecimiento propuesta.

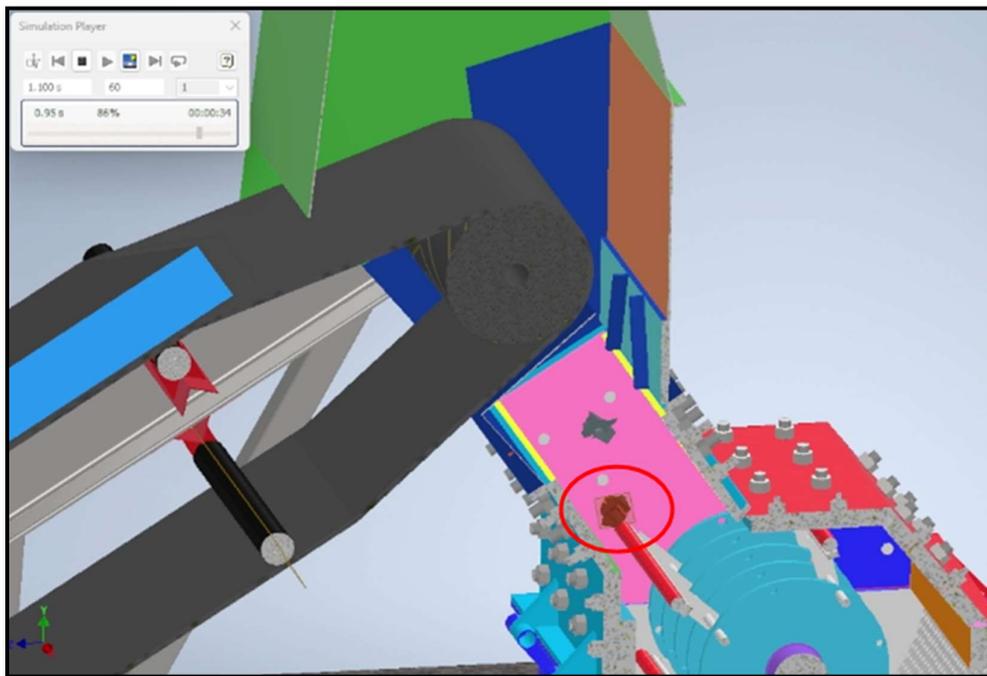


Figura 36: Simulación de trayectoria, tercer impacto con el martillo.

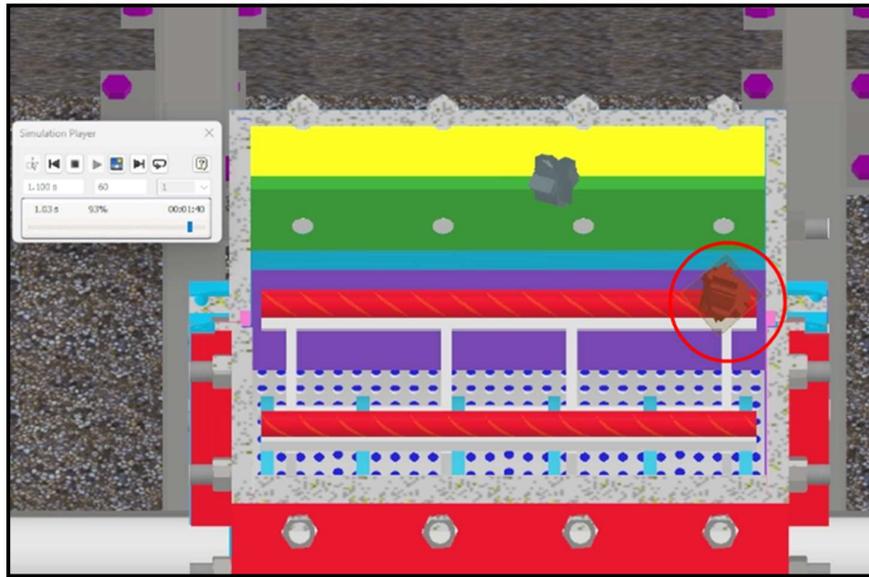


Figura 37: Vista superior del mineral chocando con la zona lateral del martillo.

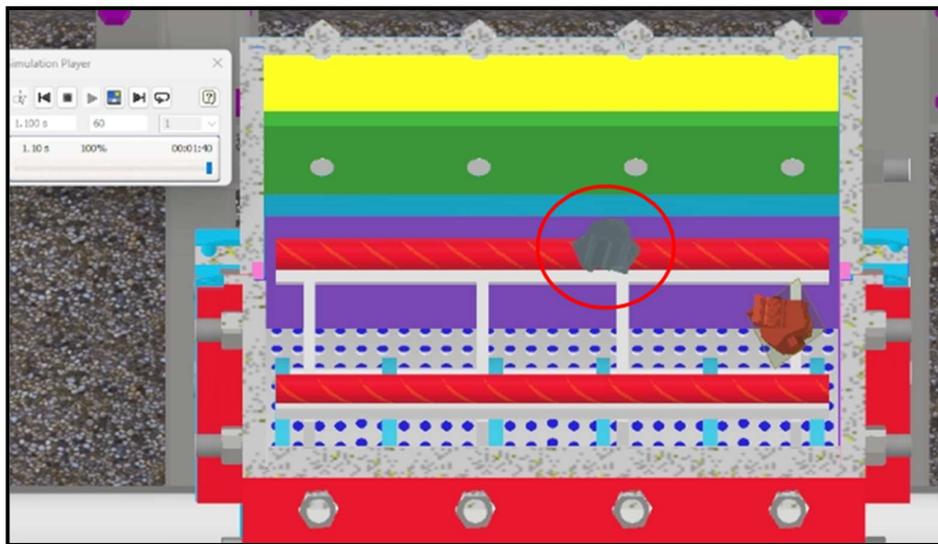


Figura 38: Vista superior del mineral chocando con la zona central del martillo.

4.4 Presupuesto para construcción del diseño propuesto

Tabla 12 : Presupuesto para la construcción del diseño propuesto.

ítem	Material	Cantidad	Costo unitario	Costo total
1	plancha metálica A36 3/16	2 unidades	490	980
2	plancha metálica A36 1/8	1 unidad	340	340
3	soldadura 7018 de 5/32	5 kg	18	90
4	soldadura de 1/2 "	5 kg	19	95
5	placa metálica de 1/2 "	1 unidad	90	90
6	ángulo de 1"x 1" X 1/8	1	27	27
7	pernos completos de 1/2"	15	2.2	33
8	discos de corte	18	8.2	147.6
9	pintura y acabados	1 unidad	140	140
10	Transporte de materiales	1 unidad	80	80
11	Mano de obra	2 personas	220	440

Total **2462.6**

4.5 Construcción del diseño propuesto

Luego de realizar la simulación y ajustar los detalles de medidas y ángulos para nuestro diseño propuesto, se presentó al gerente de la empresa los planos y también el costo de la construcción. La empresa Muki Kutana S.A.C. dio la aprobación y se compró los materiales



Figura 39: Construcción del diseño propuesto.

para empezar a construir. La construcción e instalación tardó 5 días y se emplearon dos hombres en el proceso.



Figura 40: Acoplamiento de ambas partes que componen el diseño propuesto.

4.6 Forma de martillos utilizados con el diseño propuesto.

Luego de procesar toneladas de mineral con el nuevo diseño de abastecimiento se destapo el molino para dar vuelta a los martillos y observar cómo se estaban desgastando estos. Los martillos se estaban gastando de manera uniforme tanto en el centro como en los laterales.



Figura 41: Martillos utilizados en el proceso de conminución de mineral con el diseño propuesto (Desgaste uniforme en el centro y laterales)

4.7 Variación de masa en los martillos por deterioro el diseño propuesto

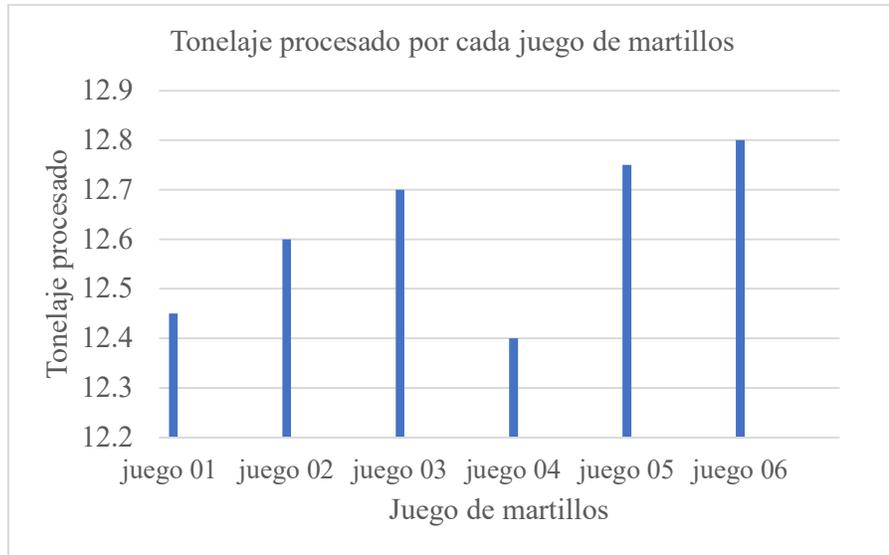
Se tomaron los siguientes datos de moliendas realizadas utilizando el diseño inicial de abastecimiento, donde se detalla la masa que pierde cada juego de martillos y el tonelaje que se llega a procesar.

Tabla 13: Medición de masa de los martillos antes y después del proceso de conminución de minerales con el diseño propuesto.

Juego de martillos	Martillos	Masa inicial (Kg)	Masa promedio (Kg)	Masa final (Kg)	Diferencia entre masa inicial y masa final (kg)	Masa perdida/ y juego de martillo (kg)	Tonelaje procesado (ton)
juego 01	martillo_01	8.43	8.73	6.4	2.03	9.83	12.45
	martillo_02	9.05	8.73	6.51	2.54		
	martillo_03	8.73	8.73	6.11	2.62		
	martillo_04	8.71	8.73	6.07	2.64		
juego 02	martillo_05	8.97	9.02	6.59	2.38	9.48	12.6
	martillo_06	9.06	9.02	6.52	2.54		
	martillo_07	9.14	9.02	6.79	2.35		
	martillo_08	8.89	9.02	6.68	2.21		
juego 03	martillo_09	9.12	9.03	6.86	2.26	9.58	12.7
	martillo_10	8.92	9.03	6.59	2.33		
	martillo_11	8.84	9.03	6.16	2.68		
	martillo_12	9.23	9.03	6.92	2.31		
juego 04	martillo_13	9.6	9.13	7.4	2.2	9.25	12.4
	martillo_14	9.2	9.13	6.47	2.73		
	martillo_15	8.92	9.13	6.91	2.01		
	martillo_16	8.81	9.13	6.5	2.31		
juego 05	martillo_17	9.04	8.97	6.99	2.05	9.60	12.75
	martillo_18	9.14	8.97	6.42	2.72		
	martillo_19	8.81	8.97	6.43	2.38		
	martillo_20	8.89	8.97	6.44	2.45		
juego 06	martillo_21	9.01	9.09	6.65	2.36	9.03	12.8
	martillo_22	8.89	9.09	6.38	2.51		
	martillo_23	9.34	9.09	7.25	2.09		
	martillo_24	9.12	9.09	7.05	2.07		

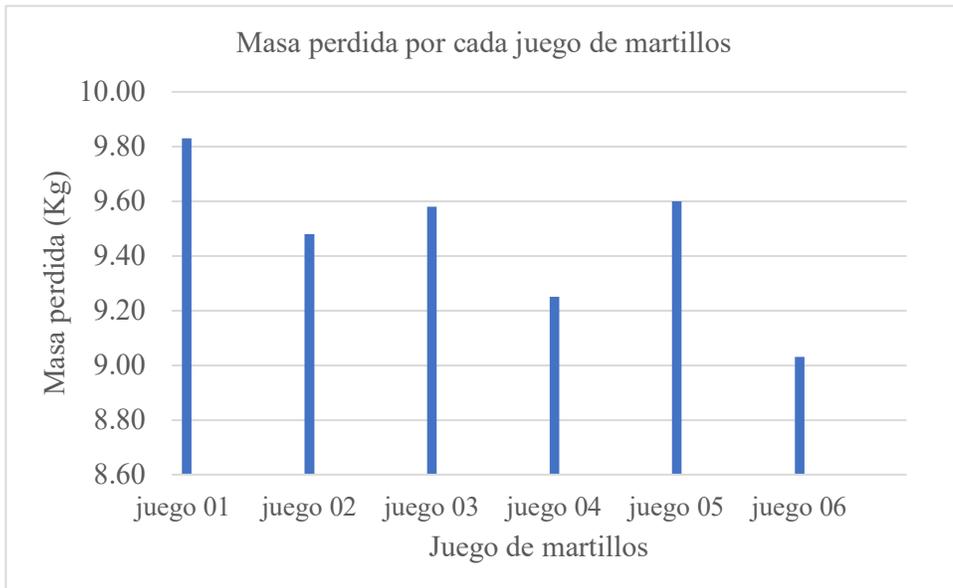
Con seis juegos de martillos se procesó 75,7 Tn de mineral. Cada juego de martillos perdió 9.46 kg en promedio durante el proceso de conminución.

Como parte del procedimiento tendremos en cuenta el siguiente gráfico que relaciona el tonelaje procedo por cada juego de martillos.



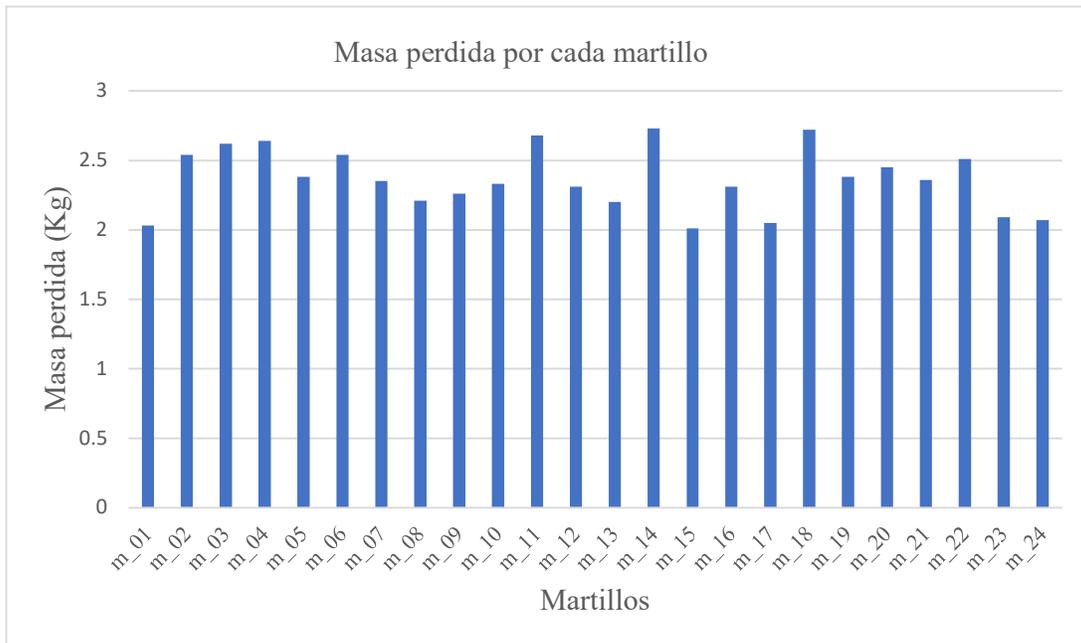
Gráfica 7 : Tonelaje procesado por cada juego de martillos con el diseño propuesto.

En base a la data obtenida de la molienda tenemos el siguiente gráfico que indica la cantidad de masa perdida por cada juego de martillos durante el proceso de conminución.



Gráfica 8: Masa perdida por cada juego de martillos durante el proceso de conminución de minerales con el diseño propuesto.

Para este caso también tomaremos en cuenta también la masa perdida por cada martillo durante el proceso de conminución y la graficaremos.



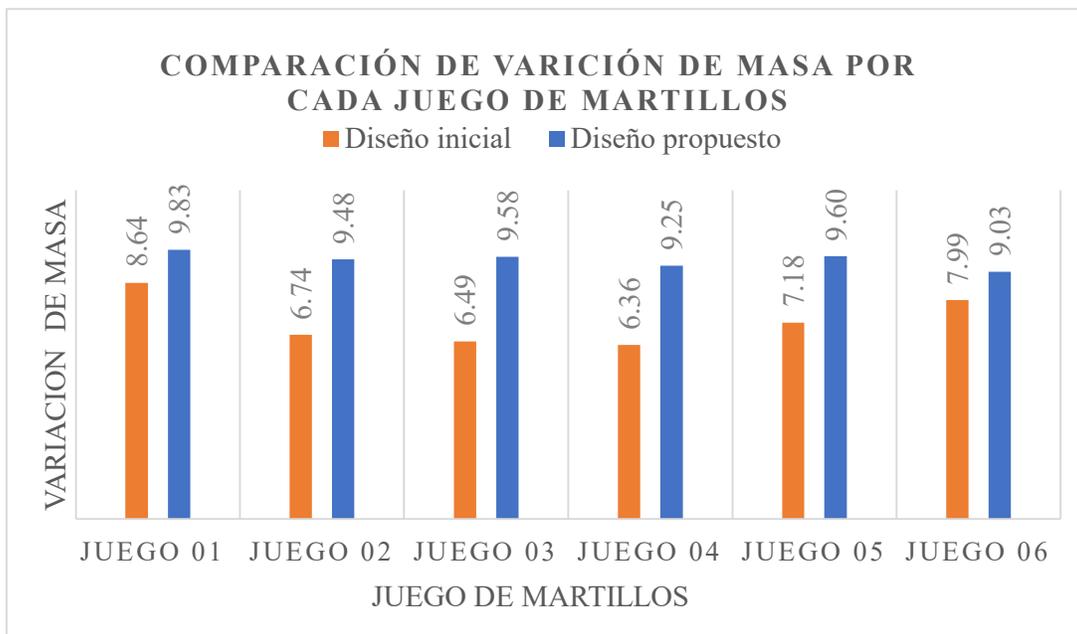
Gráfica 9: Masa perdida por cada martillo durante el proceso de conminución de minerales con el diseño propuesto

4.8 Análisis de la variación de masa por cada juego de martillos.

Al finalizar el proceso de poner en funcionamiento el diseño propuesto y tomar medidas de las masas de los martillos antes y después del proceso de conminución se puede observar una diferencia con los datos obtenidos con el diseño inicial.

El efecto de hacer un cambio en el sistema de abastecimiento se mide a partir de la variación de masa que tiene cada martillo, así como también la forma que presentan los martillos al finalizar el proceso de conminución, lo que permite deducir que el material está distribuyéndose en todo el cuerpo del martillo.

Aplicando los cálculos correspondientes para los datos obtenidos con los distintos diseños de abastecimiento según la Tabla 6 y la Tabla 8 se puede observar un considerable aumento en la variación de la masa por cada juego de martillos para el caso del diseño propuesto. Esta comparación se puede expresar mediante la Gráfica 10 a continuación.



Gráfica 10: Comparación de variación de masa por cada juego de martillos entre el diseño inicial y el diseño propuesto.

4.9 Análisis del costo de la fabricación de martillos.

Como se puede observar en la Gráfica 10 hay diferencia en la masa que pierde cada juego de martillos durante el proceso de conminución de minerales con respecto al Diseño de abastecimiento que se emplea.

Con el Diseño inicial y los datos obtenidos en la Tabla 6 se puede observar que cada juego de martillos pierde en promedio 7.23 Kg de masa antes de realizarse el cambio de martillos, mientras que con el diseño propuesto y los datos obtenidos en la Tabla 8 se puede observar que cada juego de martillos pierde en promedio 9.46 Kg de masa antes de realizar el cambio. Esto significa que ahora con el diseño propuesto se aprovechan 2.23 Kg más de masa de martillo, lo que le permite procesar más mineral antes de realizar el cambio de martillos.

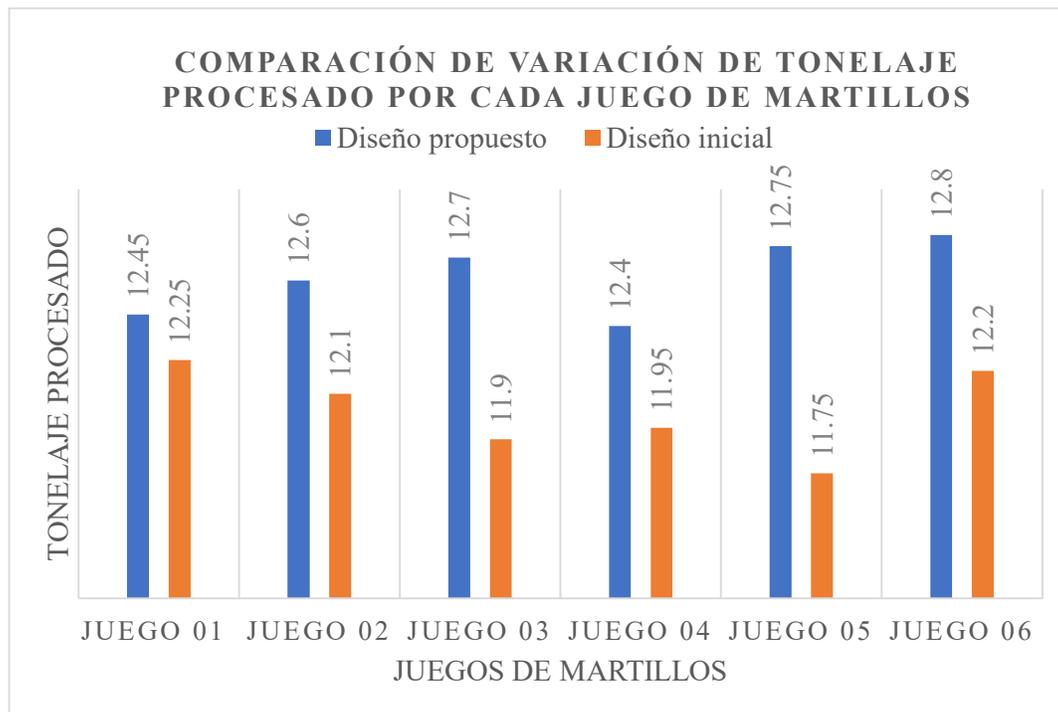
La empresa Muki Kutana S.A.C. compra varillas de fierro corrugado de 1 3/8 pulgadas a un costo de 4.20 nuevos soles el Kg. Multiplicando el costo de cada Kg de fierro por los 2.23 Kg de masa adicionales que se emplean en el proceso de conminución con el nuevo diseño propuesto se obtiene un beneficio de 9.40 nuevos soles por cada juego de martillos.

El beneficio con respecto a la capacidad de trituración de cada juego de martillos se multiplicará en cada proceso gracias a la distribución del mineral. Obteniendo un beneficio

económico más notorio a lo largo del tiempo ya que este beneficio se multiplicará por cada juego de martillos empleado en futuros procesos.

4.10 Análisis de la cantidad de mineral procesado

A partir de la medición del tonelaje procesado con distintos sistemas de abastecimiento se puede obtener un cuadro comparativo en la Gráfica 11 entre la Tabla 6 y la Tabla 8 que muestra el incremento en el tonelaje procesado por juego de martillo para el diseño propuesto en comparación con el diseño inicial. Esto debido al beneficio de los 2.23 Kg de masa adicionales de fierro corrugado que se emplean en el proceso de conminución con el diseño de abastecimiento propuesto. El aumento de tonelaje procesado por juego de martillos incremento en promedio 0.6 Tn.



Gráfica 11: Comparación de tonelaje procesado por cada juego de martillos entre el diseño inicial y el diseño propuesto.

4.11 Análisis de paradas de planta

Con el diseño propuesto las paradas de planta por roturas o fallas en el sistema de abastecimiento se mitigaron, las paradas de planta para cambio de martillos se realizan entre periodos de tiempo más largos, lo que significa que ahora se requieren menos paradas de planta por cambios de martillos ya que con el nuevo diseño se procesan 12.6 Tn por juego de martillos mientras que con el diseño inicial se procesaban 12 Tn por juego de martillos. Si tendríamos planificado procesar mil toneladas de mineral, realizando los cálculos se obtiene que con el diseño propuesto se tendría que parar la planta 79 veces para cambiar los martillos mientras que con el diseño anterior se tendría que parar la planta 83 veces.

4.12 Análisis de granulometría del resultado.

Durante el proceso de conminución de minerales, existe una persona encargada de verificar en la salida de la planta el resultado de la trituración, cuando los martillos están nuevos no hay ningún problema pues la distancia entre el martillo y las zarandas es mínima permitiendo que el martillo impacte con las partículas de mineral, pero conforme va triturando el desgaste del martillo se hace más notorio en el resultado de la granulometría pues al desgastarse la distancia entre martillo y las zarandas aumenta, evitando el impacto entre el martillo y las partículas, las cuales atraviesan la zaranda que tiene un orificio con un diámetro de 13 mm . Es en este punto donde se debe realizar el cambio de martillos pues una partícula de 4 mm o mayor puede alterar la muestra para el laboratorio. Con el diseño propuesto los reclamos por la granulometría se redujeron pues el desgaste uniforme de los martillos evita que se filtren partículas grandes que podrían alterar la muestra.

4.13 Contrastación de la Hipótesis

En el desarrollo de la presente investigación se logró demostrar la existencia de una relación significativa entre el diseño del sistema de abastecimiento y el desgaste de los martillos durante el proceso de conminución de minerales en la planta Muki Kutana S.A.C. A través del uso de herramientas avanzadas como el diseño asistido por software y la realización de simulaciones, se pudo identificar y analizar los factores que inciden en el desgaste de los componentes del proceso, específicamente los martillos, lo que permitió proponer mejoras en el sistema de abastecimiento.

El principal objetivo de la tesis fue precisamente la creación de un sistema de abastecimiento más eficiente, capaz de optimizar el uso de los insumos involucrados en el proceso de

conminución, lo cual es un aspecto clave para cualquier planta de procesamiento de minerales. A partir de los resultados obtenidos, se pudo sugerir un diseño de abastecimiento que no solo contribuye a una mayor eficiencia, sino que también reduce significativamente el desgaste de los martillos, uno de los componentes más críticos del proceso.

Las simulaciones demostraron que la implementación del nuevo sistema podría reducir la cantidad de fierro consumido en 2.23 kg por cada juego de martillos. Esta reducción en el consumo de fierro implica no solo un ahorro directo en términos de material, sino también un impacto positivo en el ciclo de vida de los equipos, al disminuir la frecuencia de los reemplazos. Además, el sistema propuesto permite procesar aproximadamente 0.6 toneladas adicionales de mineral por cada juego de martillos antes de que sea necesario su recambio, lo que incrementa la productividad de la planta sin necesidad de detener el proceso para el mantenimiento frecuente.

Asimismo, otro aspecto fundamental que se aborda en la tesis es la relación directa entre el diseño del sistema de abastecimiento y la frecuencia de paradas de planta. Las paradas de planta son uno de los mayores costos operacionales en el sector minero, debido a las pérdidas de tiempo y producción que conllevan. La reducción en el desgaste de los martillos, generada por el nuevo sistema de abastecimiento, permite alargar los intervalos entre los cambios de martillos, disminuyendo la cantidad de paradas y, por ende, mejorando la continuidad operativa.

En conclusión, el estudio no solo describe detalladamente el efecto positivo de la propuesta de un sistema de abastecimiento más eficiente, sino que también subraya los beneficios tangibles que esta mejora genera para la planta Muki Kutana S.A.C., incluyendo un ahorro significativo de insumos, un aumento en la productividad y una disminución de los costos asociados al mantenimiento. Además, se demuestra que el uso de tecnologías avanzadas para la simulación y el diseño asistido por software puede ser una herramienta clave en la toma de decisiones dentro del sector minero, facilitando la implementación de soluciones que optimicen el uso de recursos y maximicen la eficiencia operacional.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se determinó el desgaste de los martillos mediante la medición de su masa antes y después del proceso, proporcionando datos cuantitativos que permiten evaluar el impacto del proceso en su durabilidad.

La propuesta de un nuevo diseño para el sistema de abastecimiento tuvo un impacto significativo en la distribución del material. Al modificar el flujo del mineral hacia el molino, se optimizó la manera en que el material era procesado, lo que resultó en un desgaste más uniforme y controlado de los martillos. Esto permitió una mejora en la eficiencia del proceso de conminución y un mejor aprovechamiento de los componentes del sistema. Las simulaciones con Autodesk Inventor permitieron validar el nuevo diseño, optimizando la trayectoria del mineral antes de su implementación, lo que garantizó una mayor precisión en el proceso.

La modificación en el diseño del sistema de abastecimiento tuvo un impacto directo en la reducción del desgaste de los martillos y en los costos del proceso de molienda. Al mejorar la distribución del material, se redujeron las paradas de planta y se aumentó la vida útil de los martillos. Se logró un incremento en el aprovechamiento de los martillos en 2.23 kg por juego, y se pudo procesar hasta 0.6 toneladas adicionales de mineral antes de requerir un cambio de martillos. Estos beneficios no solo optimizaron el costo operativo, sino que también contribuyeron a una mayor eficiencia en la producción.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda a la empresa Muki Kutana S.A.C. realizar estudios periódicos sobre la distribución del material en el sistema de abastecimiento, utilizando herramientas de monitoreo y análisis de datos. Esto permitirá realizar ajustes oportunos y mejorar continuamente la eficiencia del proceso de conminución, adaptándose a las condiciones operativas cambiantes.

Al gerente de la planta se le recomienda continuar invirtiendo en tecnologías de diseño asistido por computadora, como Autodesk Inventor, Además, debe asegurarse de capacitar al personal para garantizar el uso óptimo de estas herramientas, lo que permitirá realizar simulaciones precisas y tomar decisiones que incrementen la eficiencia operativa y reduzcan los costos del proceso.

La empresa Muki Kutana S.A.C. antes de realizar modificaciones significativas en el circuito de conminución, debe realizar una evaluación económica detallada utilizando el diseño asistido por computadora. Esto permitirá visualizar el impacto de los cambios, realizar pruebas para disminuir errores y controlar mejor los costos operativos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez Rodríguez, 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 Bond. Universidad de Oviedo. Consultado 18 de septiembre de 2023, en <http://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/12877>
- Autodesk. (2022). Guía Autodesk Inventor Fundamentos . México: DARCO.
- Andrea Blanco E. (2018). Tecnología mineralúrgica. Cap 8 - Molienda . Universidad de Cantabria ,España. Consultado 02 de febrero de 2024, en: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/8._molienda.pdf
- Urday Alfaro, C. (2021). Evaluación metalúrgica de la etapa de chancado y molienda - clasificación, del circuito de minerales sulfurados en la planta aurífera century mining peru s.a.c. arequipa. Arequipa, Perú Consultado el 19 de febrero de 2024 en : <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/4360eedc-2543-4554-ba5f-5018ee14ba65>
- Chase, R., Jacobs, F. & Aquilano, N. (2009). Administración de operaciones: producción y cadena de suministro. México. Consultado el 22 de febrero de 2024, en: https://www.academia.edu/18895904/Administracion_de_operaciones_y_produccion_12_ed_chase_aquilano_jacobs_11
- Quispe Quispe, Claudio (2022). Implementación del circuito de remolienda. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú. Consultado 03 de marzo de 2024, en: <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/914c8645-7690-411e-9d7b-1aa0f66293c4>
- Córdova Parraga J. (2016). Diseño del sistema motriz de un molino de martillos con capacidad de procesamiento de 4 ton/h de cal hidratada. Lima. Consultado el 19 de enero del 2024 en : <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio//handle/20.500.12404/7023>
- Rodríguez Medina, D y Urrutia Tarrillo M. (2020). Diseño de propuesta de mejora del proceso de molienda para aumentar la productividad del molino semi-autógeno (sag) en minera gold fields-cerro corona. Consultado el 19 de febrero del 2024 en : <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/24855>
- Evaristo Valencia, Gaspar (2013). Proyecto para el incremento de capacidad de operación de la planta de beneficio, compañía minera la negra, maconí querétaro. Universidad

Nacional Autónoma de México .Consultado el 26 de febrero del 2024 en :
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/3653?show=full>

Machaca Luna, M. (2019). Evaluacion y mantenimiento de un molino de martillos para minerales oxidados. Arequipa, Perú .Consultado el 03 de marzo del 2024 en :
<https://repositorio.unsa.edu.pe/items/6172e813-3348-4755-b051-840253e51e92>

MAGOTTEAUX. (2024). Catalogo de productos.

INGEMET, A. S.-M. (s.f.). Metalogenia de las Regiones de La Libertad y Ancash. Lima.

Guerrero Monsalves, F. (2014). Simulación y control de un circuito de molienda. Universidad de concepción, Chile. Consultado el 04 de marzo del 2024 en :
<https://es.scribd.com/document/691569051/Tesis-Simulacion-y-Control-de-unCircuito-de-Molienda>

Valdivia Rivera, F. (2016). Análisis y mejora de procesos en la planta de producción de una empresa minera de concentrado de cobre. Lima, Perú. Consultado 04 de marzo de 2024 en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7320>

Sagastegui, F. y Hurtado W. (2020). Diseño de un molino de bolas para triturar mineral de baja ley y aumentar la producción de concentrado en la mina Esperanza, región La Libertad,2020. Trujillo, Perú .Consultado el 06 de febrero de 2024 en el enlace:
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/30466?show=full>

Gutiérrez Vilela], M. (2018). Repotenciación y automatización del molino de martillos en el laboratorio de procesos industriales de la facultad de ciencias. Riobamba -Ecuador. Consultado el 02 de marzo del 2024 en el enlace :
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/10523>

Senabre Blanes, C (2009). Diseño mecánico con autodesk inventor paso a paso San Vicente (Alicante)

Autodesk Inventor (2023). user's manual autodesk inventor nastran editor 2023 autodesk inventor. Consultado el 04 de marzo del 2024 en :
https://www.autodesk.com/sites/default/files/file_downloads/Autodesk%20Inventor%20Nastran%20Editor-2023%20User%27s%20Manual.pdf

Sitio oficial para consultas acerca del software Inventor: <https://www.autodesk.com/latam>

ANEXOS

PLANO P1: DISEÑO INICIAL DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO.

PLANO P2: DISEÑO DE ABASTECIMIENTO PROPUESTO C1.

PLANO P3: DISEÑO DE ABASTECIMIENTO PROPUESTO C2.

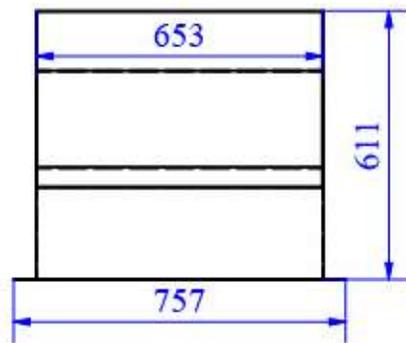
PLANO P4: ENSAMBLE DEL DISEÑO DE ABASTECIMIENTO PROPUESTO.

PLANO P5: DIMENSIONES DE MARTILLOS Y ENSAMBLAMIENTO CON EL EJE DEL MOLINO.

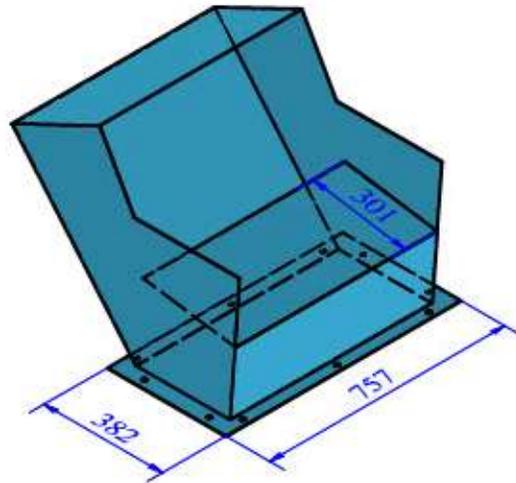
PLANO P6: MAPA GEOLÓGICO DE LA CONCESIÓN AURUM NORTH 2

DISEÑO INICIAL DE ABASTECIMIENTO

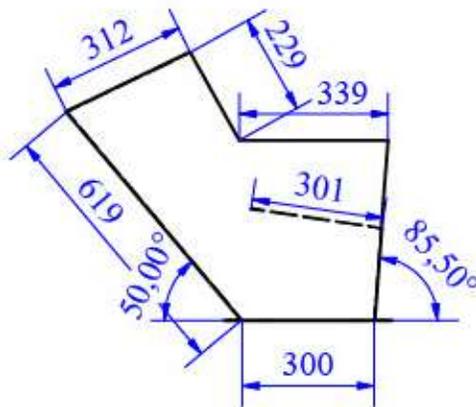
PROYECCIÓN FRONTAL



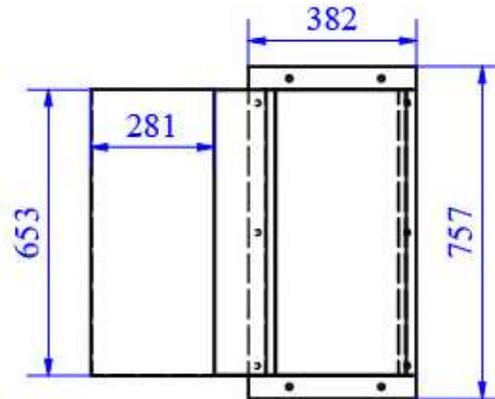
VISTA ISOMÉTRICA



PROYECCIÓN LATERAL



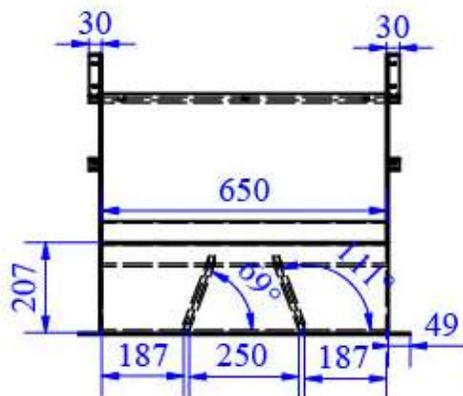
PROYECCIÓN SUPERIOR



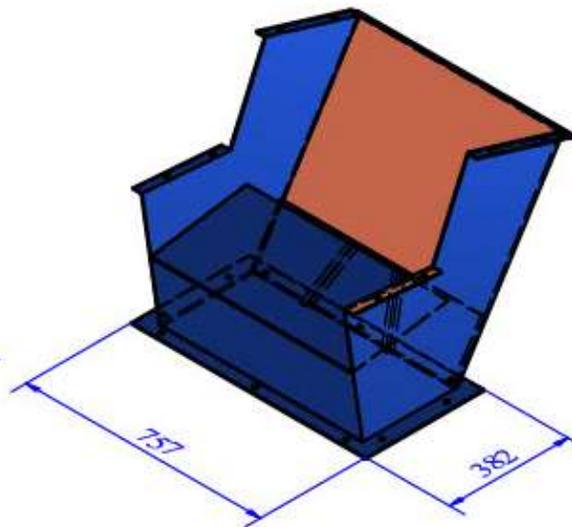
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS	
TESIS: EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN EL PROCESO DE ABASTECIMIENTO A UN MOLINO DE MÁRTILLOS EN LA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES MUKI KUTANA S.A.C. - LA LIBERTAD	Plano:
PLANO: DISEÑO INICIAL DE ABASTECIMIENTO	P1
TESIS: GIANCARLO RAMÓN CENTURIÓN CAMACHO	
ASESOR: ING. VICTOR AUSBERTO ARAPA VILCA	
ESCALA: 1 : 15	FECHA: ABRIL - 2024

DISEÑO DE ABASTECIMIENTO PROPUESTO C1

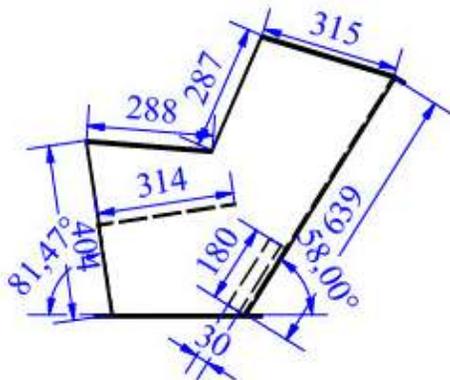
PROYECCIÓN FRONTAL



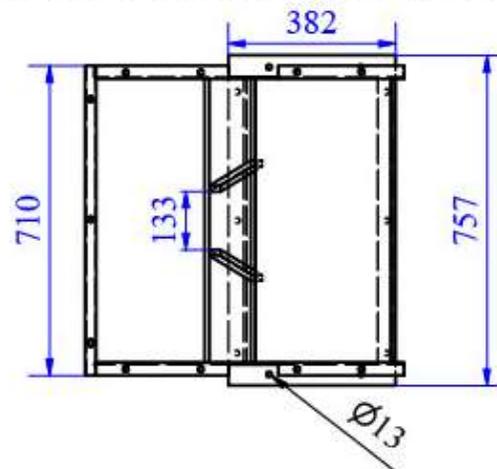
VISTA ISOMÉTRICA



PROYECCIÓN LATERAL



PROYECCIÓN SUPERIOR



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS: EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN EL PROCESO DE
ABASTECIMIENTO A UN MOLINO DE MARTILLOS EN LA PLANTA DE
PROCESAMIENTO DE MINERALES MUKI KUTANA S.A.C. - LA LIBERTAD

PLANO: DISEÑO DE ABASTECIMIENTO PROPUESTO C1

TESISTA: GIANCARLO RAMÓN CENTURIÓN CAMACHO

ASESOR: ING. VICTOR AUSBERTO ARAPA VILCA

Plano:

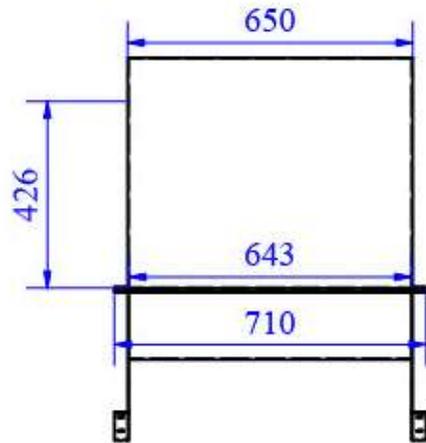
P2

ESCALA: 1 : 15

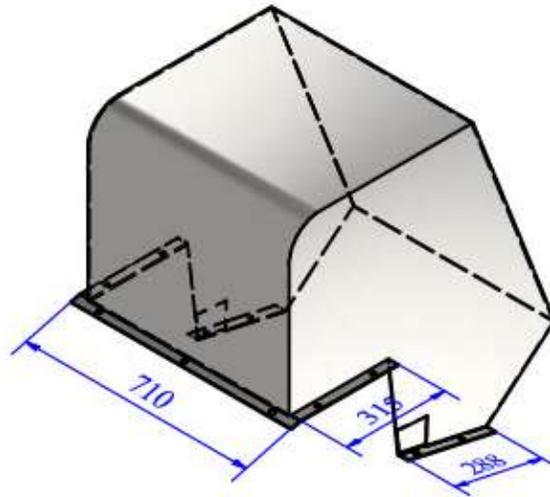
FECHA: ABRIL - 2024

DISEÑO DE ABASTECIMIENTO PROPUESTO C2

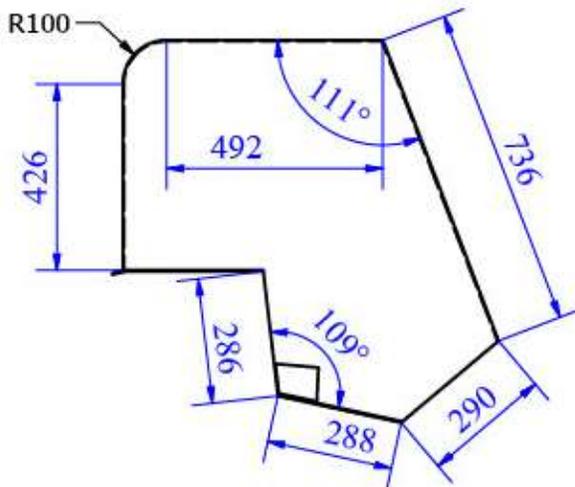
PROYECCIÓN FRONTAL



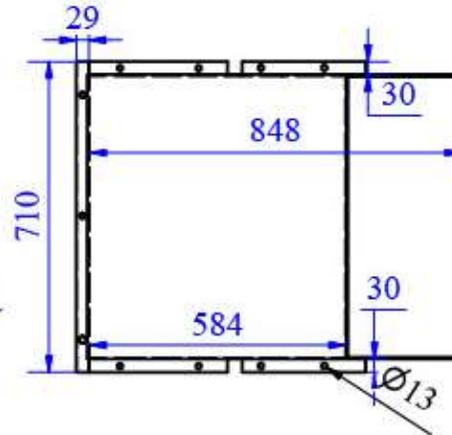
VISTA ISOMÉTRICA



PROYECCIÓN LATERAL



PROYECCIÓN SUPERIOR



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS: EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN EL PROCESO DE ABASTECIMIENTO A UN MOLINO DE MARTILLOS EN LA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES MUKI KUTANA S.A.C. - LA LIBERTAD

PLANO: DISEÑO DE ABASTECIMIENTO PROPUESTO C2

TESISTA: GIANCARLO RAMÓN CENTURIÓN CAMACHO

ASESOR: ING. VICTOR AUSBERTO ARAPA VILCA

Plano:

P3

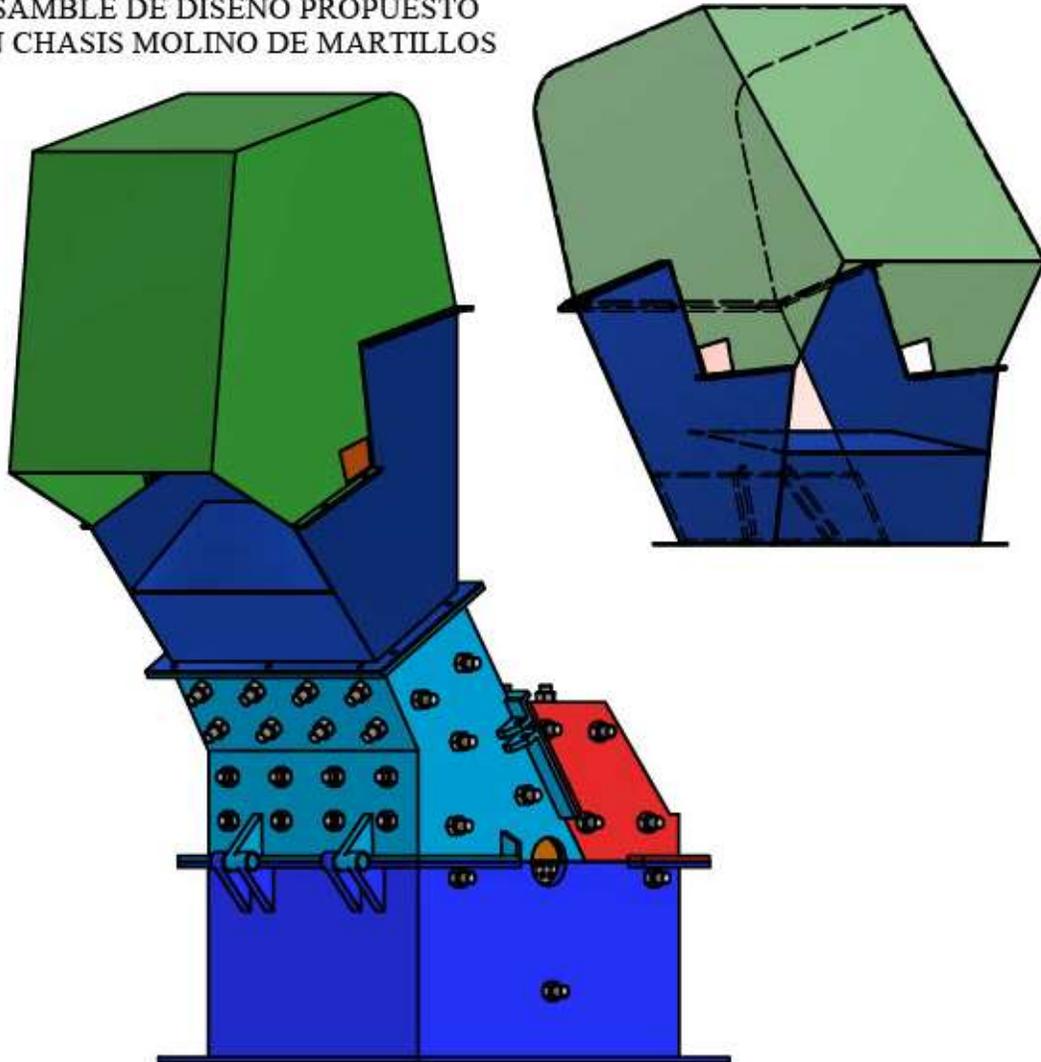
ESCALA: 1 : 15

FECHA: ABRIL - 2024

ENSAMBLE DEL DISEÑO DE ABASTECIMIENTO PROPUESTO

VISTA ISOMÉTRICA

ENSAMBLE DE DISEÑO PROPUESTO CON CHASIS MOLINO DE MARTILLOS



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS: EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN EL PROCESO DE ABASTECIMIENTO A UN MOLINO DE MARTILLOS EN LA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES MUKI KUTANA S.A.C. - LA LIBERTAD

PLANO: ENSAMBLE DEL DISEÑO DE ABASTECIMIENTO PROPUESTO

TESISTA: GIANCARLO RAMÓN CENTURIÓN CAMACHO

ASESOR: ING. VICTOR AUSBERTO ARAPA VILCA

Plano:

P4

ESCALA: 1 : 15

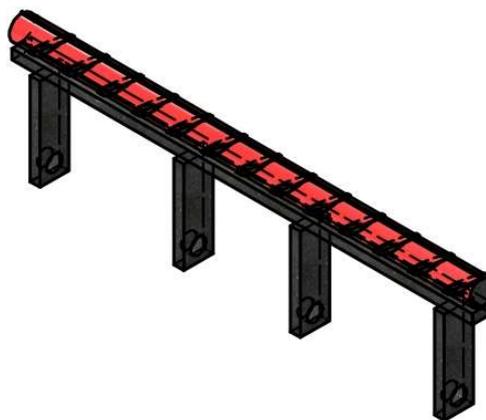
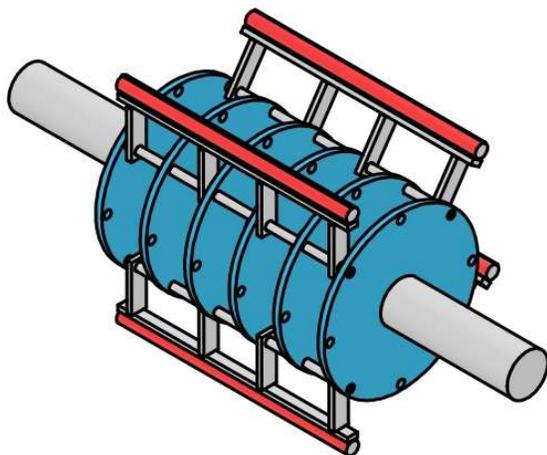
FECHA: ABRIL - 2024

DIMENSIONES DE MARTILLOS Y ENSAMBLAMIENTO CON EL EJE DEL MOLINO

ENSAMBLE DE MARTILLOS
CON EJE DEL MOLINO

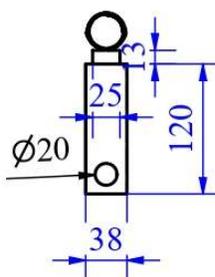
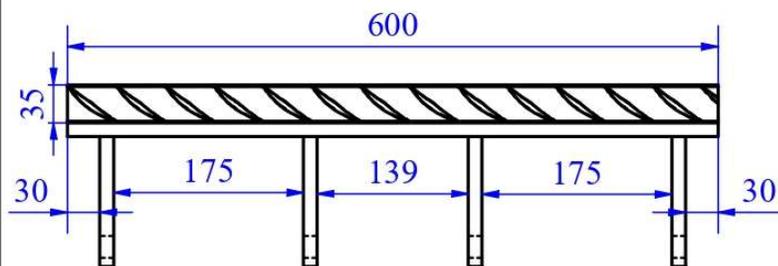
VISTA ISOMÉTRICA

ESCALA 1 / 12

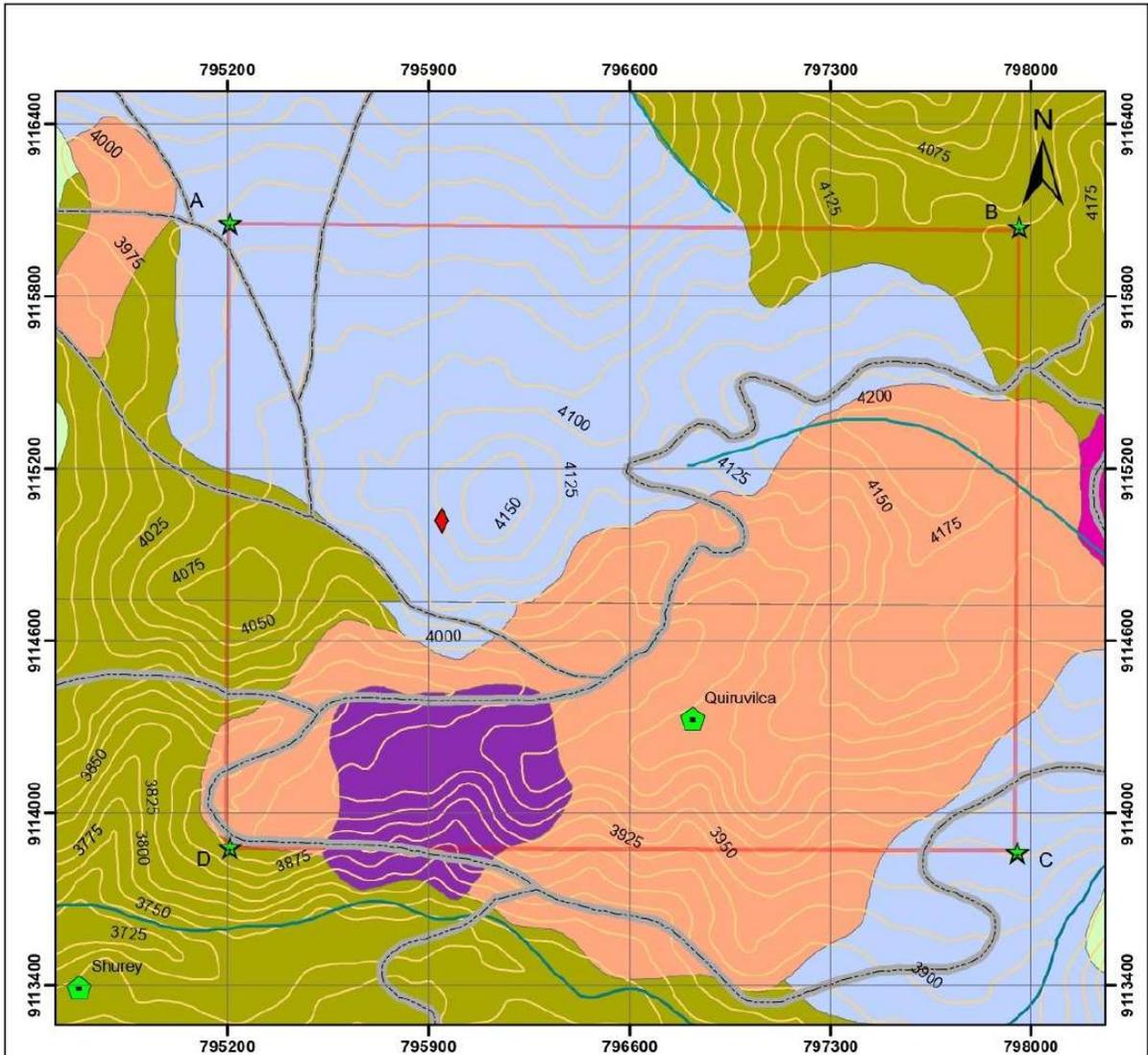


PROYECCIÓN FRONTAL

PROYECCIÓN LATERAL



	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS	
	TESIS: EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN EL PROCESO DE ABASTECIMIENTO A UN MOLINO DE MARTILLOS EN LA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES MUKI KUTANA S.A.C. - LA LIBERTAD	Plano:
	PLANO: DIMENSIONES DE MARTILLOS	P5
	TESISTA: GIANCARLO RAMÓN CENTURIÓN CAMACHO	
	ASESOR: ING. VICTOR AUSBERTO ARAPA VILCA	
ESCALA: 1 : 8	FECHA: ABRIL - 2024	



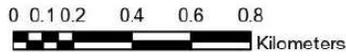
Simbología

- Labor Subterránea
- vertices
- Pueblos
- Carretera afirmada
- Carretera asfaltada
- AREA DE INTERES
- Drenaje
- curvas de nivel

Formaciones Geológicas

Nombre

- Dacita
- Depósitos de Flujos piroclásticos
- Flujos de lava andesítica, gris azulada
- Depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas
- Cuaternario pleistoceno, fluvio – glaciar
- Alteración Hidrotérmica



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
TESIS EVALUACIÓN DE EFICIENCIA EN EL PROCESO DE ABASTECIMIENTO A UN MOLINO DE MARTILLOS EN LA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES MUKI KUTANA S.A.C. – LA LIBERTAD	PLANO <h1 style="font-size: 2em;">P6</h1>	
MAPA MAPA GEOLÓGICO DE LA CONCESIÓN AURUM NORTH 2		
TESISTA GIANCARLO RAMÓN CENTURIÓN CAMACHO		
ASESOR VICTOR AUSBERTO ARAPA VILCA		
Escala 1 : 20000	DATUM WGS - 84 - ZONA - 18S	ABRIL - 2024