

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Diseño del algoritmo de visión artificial en dron para optimización del proceso de inspección de revestimientos y reducir riesgos de exposición a inspectores en molinos SAG de gran minería

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecatrónico

Elaborado por

Jhino Santos Silva Nuñez

 [0009-0001-3779-8605](https://orcid.org/0009-0001-3779-8605)

Asesor

Mg. Alcides Guillermo Joo Aguayo

 [0000-0002-8459-8489](https://orcid.org/0000-0002-8459-8489)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Silva Nuñez [1]
Referencia/Reference	[1] J. Silva Nuñez, " <i>Diseño del algoritmo de visión artificial en dron para optimización del proceso de inspección de revestimientos y reducir riesgos de exposición a inspectores en molinos SAG de gran minería</i> " [Trabajo de Suficiencia Profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2022.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Silva, 2022)
Referencia/Reference	Silva, J. (2022). <i>Diseño del algoritmo de visión artificial en dron para optimización del proceso de inspección de revestimientos y reducir riesgos de exposición a inspectores en molinos SAG de gran minería</i> . [Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Dedico este trabajo

a mis padres, Martha Nuñez y Santos Silva por su inagotable apoyo;

a mi hermana, Gisselle Silva, por su ejemplo;

y a mi científica, Edith Soto.

Resumen

Los revestimientos son productos consumibles que permiten la transferencia de energía y la protección mecánica del casco estructural de los molinos en una planta concentradora. Es necesario conocer el estado en el que se encuentran para verificar si presenta fallas durante la operación y predecir con anticipación su siguiente reemplazo.

La inspección de los revestimientos de molinos SAG en gran minería es un trabajo de alto riesgo que se puede realizar con hasta frecuencias mensuales donde inspectores altamente capacitados deben exponerse a los riesgos del espacio confinado que el molino representa. Por tanto, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo mejorar la seguridad de la tarea de inspección de revestimientos de molinos aplicando la tecnología de visión artificial para habilitar el ingreso de un dron que sustituya la exposición a riesgos de los inspectores.

Se trabaja con el levantamiento de un escenario real de molino SAG con tecnología de escáner 3D para generar un gemelo digital en diseño 3D para medir las dimensiones y realizar pruebas a escala en un entorno real donde se aplicará la tecnología de visión artificial con una cámara IP. Esto debe validar la aplicación de tecnología a la actividad y mejorar su nivel en la jerarquía de controles de riesgo.

Palabras clave: visión artificial, molino SAG, seguridad, diseño 3D

Abstract

The mill liners are consumables products that allow the transfer of energy and provide mechanical protection to the structural shell of mills in a concentrator plant. It is necessary to know their condition to verify if there are any failures during operation and to predict their next replacement in advance.

The inspection of SAG mill linings in large-scale mining is a high-risk task that can be performed with frequencies up to monthly, where highly trained inspectors must expose themselves to the risks of the confined space that the mill represents. Therefore, the purpose of this research work is to improve the safety of the task of inspecting mill linings by applying artificial vision technology to enable the entry of a drone that replaces the inspectors' exposure to risks.

Work is being done on the development of a real SAG mill scenario using 3D scanner technology to create a digital twin in 3D design, to measure the dimensions and conduct scale tests in a real environment where artificial vision technology with an IP camera will be applied. This should validate the application of technology to the activity and improve its level in the risk control hierarchy.

Key words: artificial vision, SAG mill, safety, 3D design.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	iv
Abstract	v
Tabla de Contenido	vi
Introducción	xi
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	5
1.3 Objetivo del estudio	7
1.3.1 Objetivo general	7
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4 Antecedentes investigativos	8
1.4.1 Investigaciones internacionales	8
1.4.2 Investigaciones nacionales	11
1.4.3 Investigaciones locales	12
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	15
2.1 Marco teórico	15
2.1.1 Proceso de Molienda	15
2.1.2 Historia de los molinos mineros	16
2.1.3 Revestimientos de molinos mineros	22
2.1.4 Tecnologías de monitoreo de desgaste	24
2.1.5 Dron	28
2.1.6 Visión Artificial	29
2.1.7 Open CV	29
2.2 Marco conceptual	30
2.2.1 Molino	30
2.2.2 Revestimiento	31
2.2.3 Espesor	31
2.2.4 Escáner	31
2.2.5 Cámara	31
2.2.6 Confinado	31
2.2.7 Seguridad	31

Capítulo III. Hipótesis y operacionalización de variables.....	32
3.1 Hipótesis general.....	32
3.2 Hipótesis específicas.....	32
3.3 Operacionalización de variables.....	32
Capítulo IV. Metodología de la investigación.....	33
4.1 Tipo y diseño de la investigación.....	33
4.1.1 Tipo de investigación.....	33
4.1.2 Diseño de la investigación.....	33
4.2 Unidad de análisis.....	33
4.3 Matriz de consistencia.....	35
Capítulo V. Desarrollo del trabajo de investigación.....	36
5.1 Análisis de seguridad.....	38
5.1.1 Seguridad en mantención de molinos horizontales.....	39
5.1.2 Análisis de nivel de riesgo.....	41
5.2 Análisis de ingeniería.....	48
5.3 Cálculo de trayectoria de dron.....	59
5.4 Desarrollo de algoritmo de visión artificial.....	64
5.5 Criterios de selección de equipos.....	79
Capítulo VI. Análisis y discusión de resultados.....	82
6.1. Análisis de algoritmo de visión artificial.....	82
6.1.1 Pruebas de algoritmo de marca Aruco individual.....	82
6.1.2 Pruebas de algoritmo para identificación de ingreso a molino SAG.....	85
6.1.3 Selección de equipos.....	93
6.2. Análisis de seguridad en inspección con visión artificial.....	95
Conclusiones.....	98
Recomendaciones.....	100
Referencias bibliográficas.....	101
Anexos.....	106

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Procesos de Inspección de desgaste actuales</i>	6
Tabla 2 Incremento del tamaño de molino de bolas durante el siglo XX.....	17
Tabla 3 Clasificación de tipos de dron	28
Tabla 4 Unidad de Análisis	34
Tabla 5 Matriz de Consistencia de la Investigación	35
Tabla 6 Estadística de accidentes en cambio de revestimientos de minera Escondida	39
Tabla 7 IPERC Línea Base para Inspección de molino SAG procedimiento actual	44
Tabla 8 IPERC Línea Base para Inspección de molino SAG procedimiento con dron.....	47
Tabla 9 Parámetros de molino SAG 40'x24'	49
Tabla 10 Distancia máxima de detección de marcas por tamaño y resolución	66
Tabla 11 Posicionamiento de cámara para captura de datos	68
Tabla 12 Posicionamiento de cámara para identificación de marcas Aruco.....	73
Tabla 13 <i>Funciones paramétricas de trayectoria de dron</i>	78
Tabla 14 Especificaciones técnicas de 3 drones comerciales.....	81
Tabla 15 Parámetros medidos por visión artificial.....	83
Tabla 16 Margen de error por metodología	84
Tabla 17 Posicionamiento de cámara en Escenario 1	87
Tabla 18 Posicionamiento de cámara en Escenario 2	89
Tabla 19 Distancias a marcas Aruco en 6ta posición	90

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Evolución del PBI minero peruano 2000-2019</i>	1
Figura 2 Variación mensual del PBI durante la pandemia	2
Figura 3 Variación % mensual del PBI y PBI Minero	3
Figura 4 Tipos de circuitos de molienda	4
Figura 5 Evaluación de modelo de desgaste de modelo neuronal-difuso	9
Figura 6 Instalación de sistema SSD de HighService Corp.	10
Figura 7 Cámara MCU e iluminación instalados en la estructura de alimentación de mineral.....	11
Figura 8 Diseño de sistema eléctrico de procesamiento de señales de sensor piezoeléctrico.....	12
Figura 9 Método diagrama de bloques neuro-difuso	13
Figura 10 Comparativa de medición por visión computacional y mecánica	14
Figura 11 Proceso de alimentación en molino convencional	16
Figura 12 Molino de bolas	18
Figura 13 <i>Molino SAG</i>	20
Figura 14 Movimiento interno de la carga en un molino	20
Figura 15 Mecanismos de conminución de partículas	21
Figura 16 Revestimientos internos de un molino SAG	22
Figura 17 a) Sistema de sujeción externo. (b) Instalación de revestimientos híbridos Megaliner.....	23
Figura 18 Peineta de medición.....	25
Figura 19 Control de desgaste de revestimiento con ultrasonido	26
Figura 20 Escáner láser 3D FARO	27
Figura 21 Sistema de visión artificial	29
Figura 22 Logo de OpenCV	30
Figura 23 Diagrama de flujo del desarrollo del trabajo de investigación	37
Figura 24 PETS para cambio de Revestimientos Interiores	40
Figura 25 Jerarquía de los controles de riesgo.....	41
Figura 26 Zona exterior del molino.....	50
Figura 27 Levantamiento de escaneo 3D en exterior de molino SAG	51
Figura 28 Diseño 3D del escenario de análisis.....	52
Figura 29 Mapa de desviaciones de zona de ingreso a molino	53
Figura 30 Corte transversal de trunnion	54
Figura 31 Marca Aruco 6x6_1000-13	56

Figura 32	Posición de marcas Aruco.....	57
Figura 33	Distancias de ingeniería entre marcas Aruco y posición inicial.....	58
Figura 34	Posición inicial de los 3 escenarios de análisis.....	59
Figura 35	Grados de libertad de dron.....	60
Figura 36	Trayectorias de recorrido de dron para ingreso a molino.....	61
Figura 37	Trayectorias de retirada	64
Figura 38	Ancho de estructura de ingreso al molino SAG	65
Figura 39	Sistema de referencia en marca Aruco	67
Figura 40	Entorno real de prueba para 3 posiciones de la cámara.....	68
Figura 41	Calibración de cámara 1920x1080 con chessboard 7x10 (a) captura de imágenes (b) resultados de parámetros.....	69
Figura 42	Diagrama de flujo de algoritmo para identificación de marca Aruco	70
Figura 43	Entorno real de prueba para identificación de marcas Aruco.....	72
Figura 44	Diagrama de flujo de algoritmo para identificación de ingreso de dron a molino SAG.....	74
Figura 45	Pruebas de posicionamiento en primer escenario (a) Punto Inicial (b) Movimiento #1 (c) Movimiento #2 (d) Movimiento #3 (e) Movimiento #4 (f) Movimiento #5	86
Figura 46	Pruebas de posicionamiento en segundo escenario (a) Punto Inicial (b) Movimiento #1 (c) Movimiento #2 (d) Movimiento #3 (e) Movimiento #4 (f) Movimiento #5.....	88
Figura 47	Diámetro de ingreso a molino SAG	92
Figura 48	Dron Elios 3	95

Introducción

Los revestimientos de molinos son una industria que involucra gran parte de producción de acero en el mundo y permiten el continuo funcionamiento de las plantas procesadoras más reconocidas a nivel global, su instalación consiste en cientos de piezas dentro del molino y la falla de un solo revestimientos compromete al set completo, a la detención del molino y la pérdida de producción de una minera.

La ingeniería que se trabaja para su diseño es especializada y personalizada para cada operación minera que cumple distintos objetivos operacionales para su producción. Sin embargo, inspeccionar estos componentes consumibles expone la seguridad de los especialistas inspectores, por lo tanto, este trabajo de investigación tiene como aporte aplicar la tecnología actual de visión artificial para mejorar la seguridad en la actividad de inspección de revestimientos de molinos.

El contenido del presente trabajo de suficiencia profesional tiene por estructura seis capítulos que se describen de la siguiente manera:

En el capítulo 1, se presenta una introducción sobre la importancia que la minería representa en nuestro país. Asimismo, se describe cómo opera una planta concentradora en las operaciones de gran minería y la importancia del molino SAG en la misma. El capítulo se complementa con los objetivos del estudio y los antecedentes investigativos internacionales, nacionales y locales analizados para este caso.

En el capítulo 2, se desarrolla el marco teórico sobre el proceso de molienda, historia de los molinos mineros y sus revestimientos en distintas aplicaciones. También se da enfoque a las tecnologías actuales para monitorear el desgaste de los revestimientos y se contextualiza sobre el dron y la visión artificial. Finalmente se presenta el marco conceptual para identificar los términos técnicos empleados.

En el capítulo 3, se detalla la hipótesis y descripción de las variables de hipótesis dependiente e independiente para el presente trabajo de suficiencia profesional.

En el capítulo 4, se desarrolla la metodología de investigación a través del tipo y diseño de la investigación que se complementa con la unidad de análisis y se presenta la matriz de consistencia.

En el capítulo 5, se presenta el desarrollo del trabajo de investigación que consiste en realizar la obtención y análisis de datos para los acápite de seguridad, ingeniería y desarrollo del algoritmo de visión artificial. Se generan los diagramas de flujo por cada acápite y se recopila la información para su posterior análisis.

En el capítulo 6, se analizan los resultados obtenidos en el capítulo previo. Se discuten los valores categóricos y numéricos calculados para conocer el rendimiento en la aplicación de visión artificial en la seguridad de los inspectores.

En el capítulo 7, se presentan las conclusiones del trabajo de investigación y en el capítulo 8, las recomendaciones.

El capítulo 9 corresponde a las referencias bibliográficas y el capítulo 10 muestra los anexos.

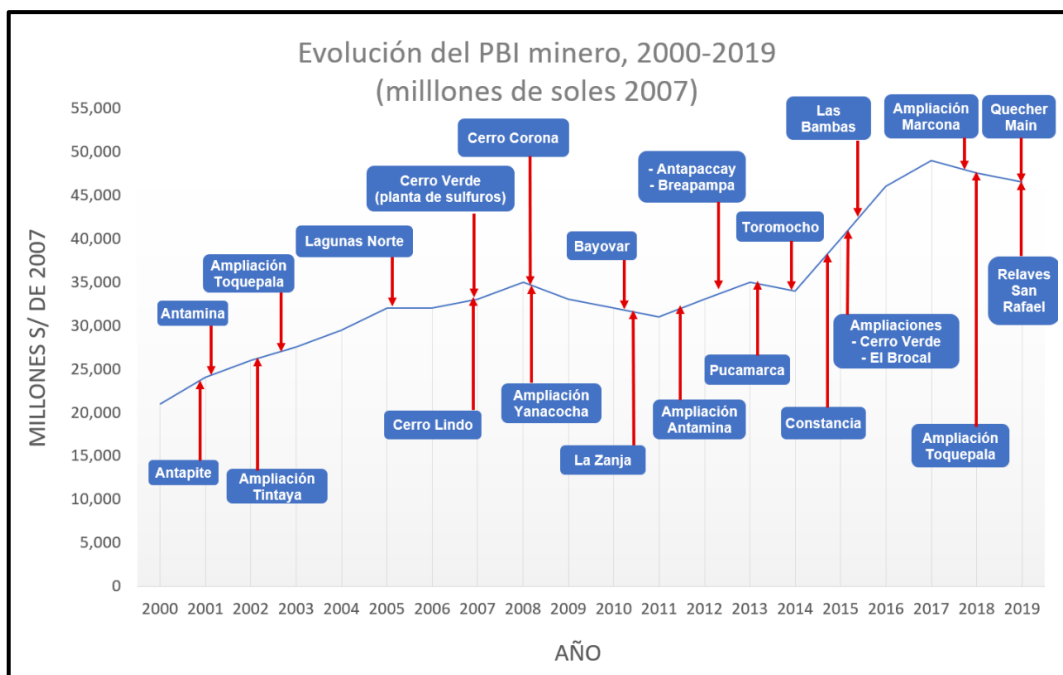
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

La minería demuestra ser una actividad productiva de alta importancia en el Perú. El PBI que se genera por esta actividad representa el 10% del total de la economía nacional y explica el 62% de todas sus exportaciones (gob.pe, 2023) , este crecimiento en la producción se genera principalmente por la entrada de grandes proyectos mineros y las respectivas ampliaciones, las cuales impactan directamente en el aporte al PBI nacional (ver Figura 1).

Figura 1

Evolución del PBI minero peruano 2000-2019

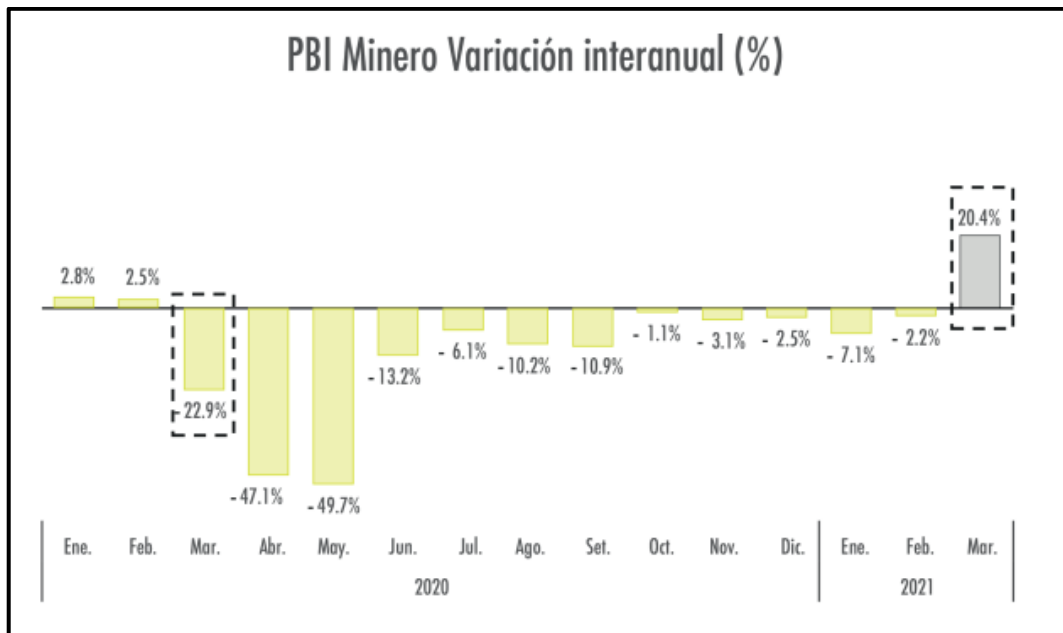


Nota: fuente Contribución de la minería a la economía nacional (Instituto Peruano de Economía, 2021)

Durante el año 2020, la pandemia generada por el coronavirus SARS-CoV-2 afectó en gran medida la economía del Perú, lo que ocasionó una cuarentena que detuvo varias operaciones mineras y que progresivamente, durante el segundo semestre del año, muestra señales de recuperación con importantes avances de producción (ver Figura 2).

Figura 2

Variación mensual del PBI durante la pandemia

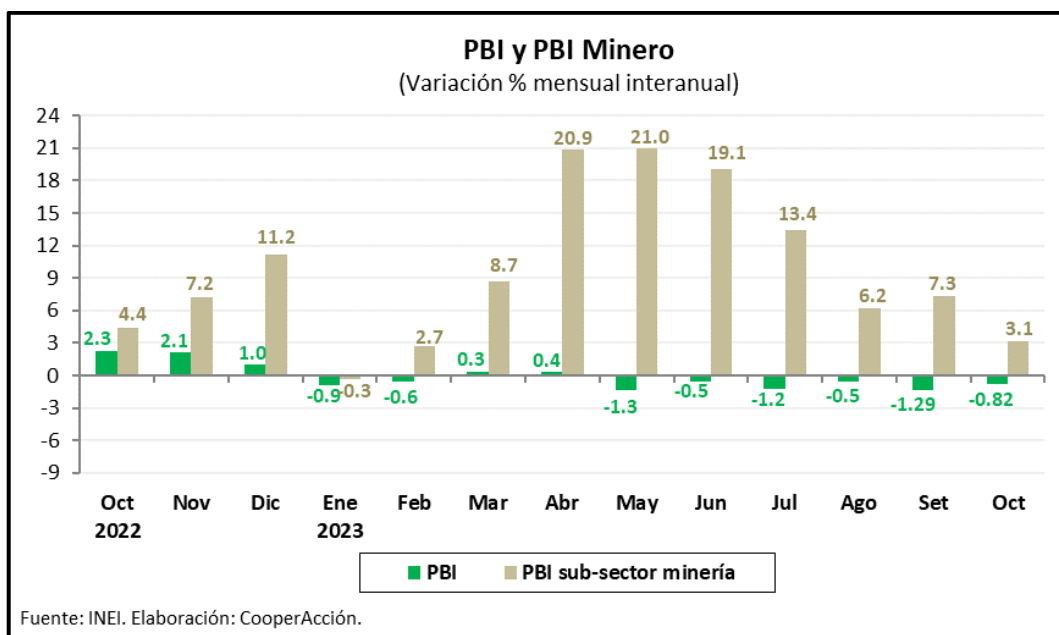


Nota: fuente Guía de proveedores IIMP 2021 (Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, 2021)

Para el año 2023, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) analizó la tendencia del Producto Bruto Interno (PBI) del Perú, el cual experimentó una tendencia decreciente acumulada de 0.27%. Sin embargo, para el PBI minero mostró una tendencia contraria con un incremento acumulado del 9.97% y se espera que el sector de minería metálica crezca en un 8.8% para el 2024 (CopperAcción, 2023).

Figura 3

Variación % mensual del PBI y PBI Minero



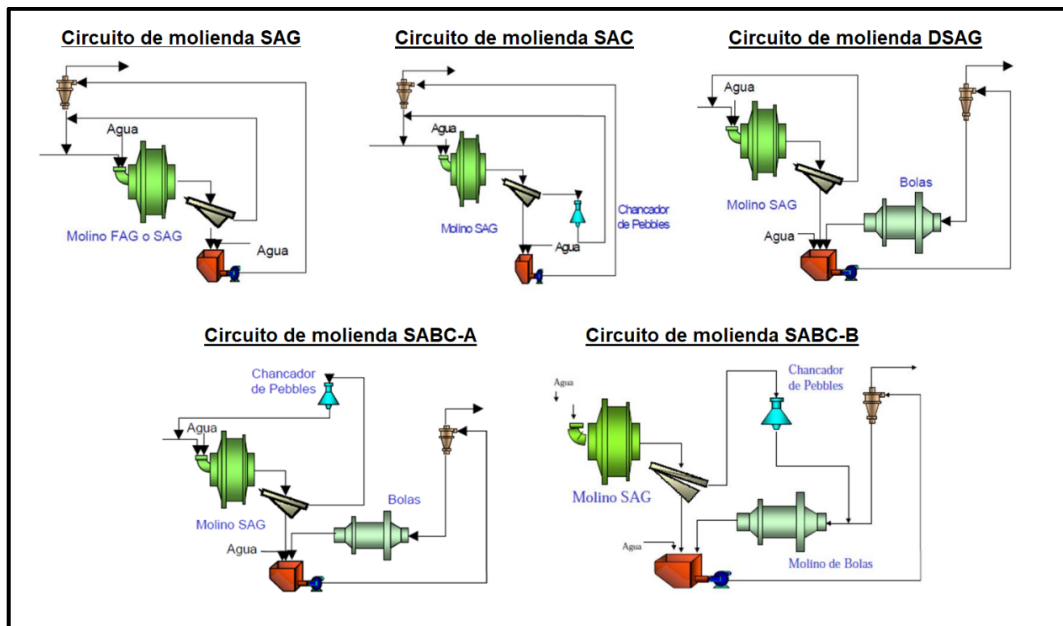
Nota: fuente CooperAcción: Economía y Minería (CooperAcción, 2023)

Las compañías mineras polimetálicas trabajan con plantas de procesamiento para realizar la extracción de minerales que llegan desde la etapa de voladura hasta la extracción final del concentrado. En el flujo de proceso, los equipos de molienda realizan el trabajo de conminución de las rocas que contienen el mineral para la reducción del tamaño de las partículas.

Las operaciones mineras diseñan diagramas de flujo para la configuración de sus molinos y etapas de molienda. El molino SAG representa un equipo importante en la cadena de molienda, este procesa la mayor cantidad de tonelaje y disminuye el tamaño de las rocas grandes a muestras pequeñas que lo posicionan como uno de los equipos mineros que más energía consume. Las operaciones mineras cuentan con distintos circuitos de molienda (ver Figura 4).

Figura 4

Tipos de circuitos de molienda



Nota: fuente Incremento de throughput en la etapa de molienda SAG, para la optimización de las variables de la función selección y fractura, en la Compañía Minera Antamina S.A. – 2019 (Rupay, Rogelio Roly Rojas, 2019)

La detención por mantenimiento de un molino SAG 40' conlleva costos para la operación minera de 70,000 USD por cada hora que este se detenga por mantenimientos programados o paradas de emergencia [6].

Para optimizar el proceso de moliendabilidad, transferir la energía al interior del molino, proteger el acero estructural y realizar una clasificación adecuada, el molino SAG es revestido en su interior con componentes consumibles diseñados a medida.

Los revestimientos internos de los molinos consideran en su diseño parámetros como material, peso, cantidad de piezas, ángulo de levante, área útil, etc. Estos parámetros cumplen el objetivo de maximizar la vida útil de los revestimientos internos, mantener una correcta transferencia de energía al interior del molino y evitar poner en riesgo la integridad del acero estructural del molino cuando se consuman los revestimientos.

Los procesos de inspeccionar o retirar los revestimientos internos de un molino están considerados como trabajos de alto riesgo que deben seguir procedimientos

establecidos por cada compañía minera cumpliendo la ley del país de operación. La importancia de aplicar el Análisis de Trabajo Seguro (ATS) y el proceso de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgo (IPERC) en las labores de mantenimiento de molinos ayudan a disminuir los riesgos que pueden tener como resultado lesiones menores hasta lesiones fatales (Chile, 2016).

La aplicación de nuevas tecnologías 4.0 al sector minero impulsan una mejora en los resultados como la producción diaria, mayor acceso a información en menor tiempo y mejor seguridad para el personal involucrado. El dron es una tecnología moderna que, gracias a su facilidad de uso y aplicación de cámaras especiales, permite obtener datos digitales en menor tiempo y costos. El análisis de la implementación de esta tecnología en la minera peruana Chinalco S.A. demuestra que, con la información registrada por el dron en conjunto con su post-procesamiento, existe mejora en la calidad de los resultados y puede ser aplicado en las distintas fases del proceso productivo como topografía, control de operaciones, prevención de riesgos, control ambiental entre otros (Matías, 2020).

1.2 Descripción del problema de investigación

Las compañías mineras polimetálicas operan con plantas concentradoras para realizar la extracción de minerales que empieza en la etapa de voladura hasta la extracción final del concentrado de mineral. En el flujo de proceso, los equipos de molienda realizan el trabajo de conminución de las rocas que contienen el mineral para la reducción del tamaño de las partículas. La detención no programada de los equipos de molienda ocasiona pérdidas económicas altas para la compañía minera, por ende, los operadores deben manejar un control adecuado de la mantención preventiva de todos los equipos.

El molino SAG opera como un equipo importante en el proceso de molienda, su detención por mantenimientos no programados conlleva costos elevados por cada hora que este se detenga, por ejemplo, en un molino SAG 40 ft. el costo aproximado es de 70,000 USD por hora. El molino SAG procesa la mayor cantidad de tonelaje y disminuye el

tamaño de las rocas grandes a muestras pequeñas. El molino SAG se posiciona como uno de los equipos mineros que consume mayor energía eléctrica en la planta procesadora.

Para evitar detenciones de emergencia no programadas por daño estructural, los molinos SAG son revestidos internamente con piezas consumibles que permiten transferir la energía al interior del molino, proteger el acero estructural y realizar una clasificación adecuada del mineral. Por ende, los revestimientos internos deben un monitoreo continuo de vida útil a través de distintos procesos de inspección para planificar adecuadamente los mantenimientos predictivos.

Los procesos de inspección de revestimientos se distinguen por el tiempo de inspección, la exposición del personal a riesgos de espacio confinado y la precisión de medidas en los resultados (ver Tabla 1):

Tabla 1

Procesos de Inspección de desgaste actuales

Proceso de Inspección	Precisión	Confiabledad de resultados	Personal necesario	Tiempo de ejecución	Costo estimado
Escáner 3D	± 2mm.	Alta	2	15 min.	Muy Alto
Peineta	± 10mm.	Media	3	1 hora	Medio
Ultrasonido	± 2mm.	Alta	3	1 hora	Alto
Manual (Taladro y Punzón)	± 10mm.	Media	3	1 hora	Medio
Pernos inteligentes	± 10mm.	Media	1	Constante	Muy Alto

Nota: fuente Elaboración propia.

El mantenimiento programado o por emergencia de los molinos SAG están catalogados como trabajos de alto riesgo para el personal involucrado dado que los molinos mineros son considerados como espacios confinados. Acorde con el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería D.S. N°24-2016-EM modificado por D.S. N°23-

2017-EM, en un espacio confinado existen condiciones de alto riesgo como falta de oxígeno, presencia de gases tóxicos y otros similares que requieren de un Permiso Escrito de Trabajo de Alto Riesgo (PETAR) para disminuir las probabilidades de riesgos que afecten la salud y seguridad de los trabajadores además de detenciones imprevistas en la operación minera.

En los procesos de inspección se identifican la falta de aplicaciones de desarrollos tecnológicos que cumplan con los requerimientos y condiciones ambientales de las operaciones mineras, por ejemplo, la tecnología de los drones para inspeccionar el interior del molino aún requiere de un sistema que permita su vuelo autónomo identificando su ingreso y salida al molino sin colisiones.

Las inadecuadas o falta de capacitaciones y entrenamientos del personal involucrado en el trabajo de inspección o mantenimiento de molinos, expone su seguridad a riesgos que ocasionan accidentes leves, incapacitantes o mortales. Las consecuencias de este tipo de accidentes se evalúan en una investigación que resulta en sanciones para la operación minera que va desde sanciones monetarias hasta suspensión parcial o total de operaciones.

Por lo que se plantea la siguiente interrogante:

¿De qué manera los deficientes procesos de inspección de revestimientos de molinos SAG en gran minería influyen en la exposición a riesgos del personal involucrado durante la recolección de datos?

1.3 Objetivo del estudio

1.3.1 Objetivo general

- Mejorar la salud ocupacional en la inspección de revestimientos de molinos SAG en gran minería basado en el diseño de un algoritmo de visión artificial para referenciar la trayectoria del vuelo de un dron.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar la trayectoria para el dron durante la inspección de revestimientos de molinos SAG en gran minería.
- Evaluar el impacto del uso del dron en la seguridad de la inspección de molinos, contrastando con el procedimiento actual.

1.4 Antecedentes investigativos

En el campo de la ingeniería de revestimientos de molinos de procesamiento mineros se desarrollan continuamente investigaciones para optimizar su desempeño y aplicación. Los resultados de estas investigaciones muestran beneficios económicos para la operación minera y la empresa proveedora. Un área de estas investigaciones son los distintos tipos de procesos de inspección para analizar el desgaste de los revestimientos, se presentan resúmenes de innovaciones tecnológicas, papers, tesis de pregrado y posgrado de distintas universidades internacionales y nacionales.

1.4.1 Investigaciones internacionales

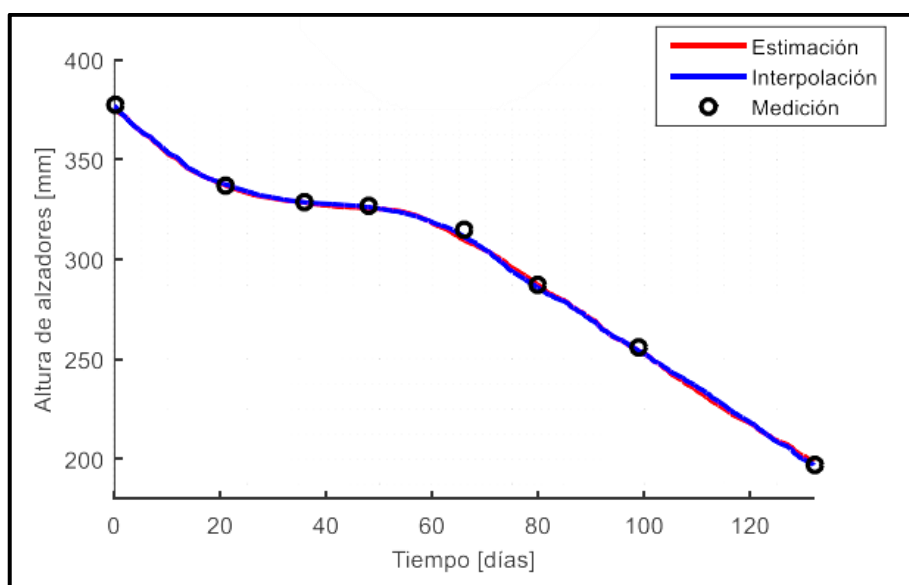
- **Quilodrán Omar (2018) “Modelación Neuro-difusa del desgaste de alzadores y nivel de llenado de molinos SAG” (Rodríguez, 2018)**

De la tesis se menciona una solución de medición de desgaste y nivel de llenado de molinos SAG a través de un sensor virtual que se calibra con data operacional de la operación minera, simulaciones DEM y modelos neuro-difusos para la estimación de resultados.

Se demuestra que el modelo necesita de datos recogidos de terreno para su correcta calibración. Los resultados de la tesis muestran una correlación entre las mediciones convencionales y la estimación de valores obtenidos con el modelo neuro-difuso (ver Figura 5).

Figura 5

Evaluación de modelo de desgaste de modelo neuronal-difuso



Nota: fuente Modelación neuro-difusa del desgaste de alzadores y nivel de llenado de molinos SAG (Rodríguez, 2018)

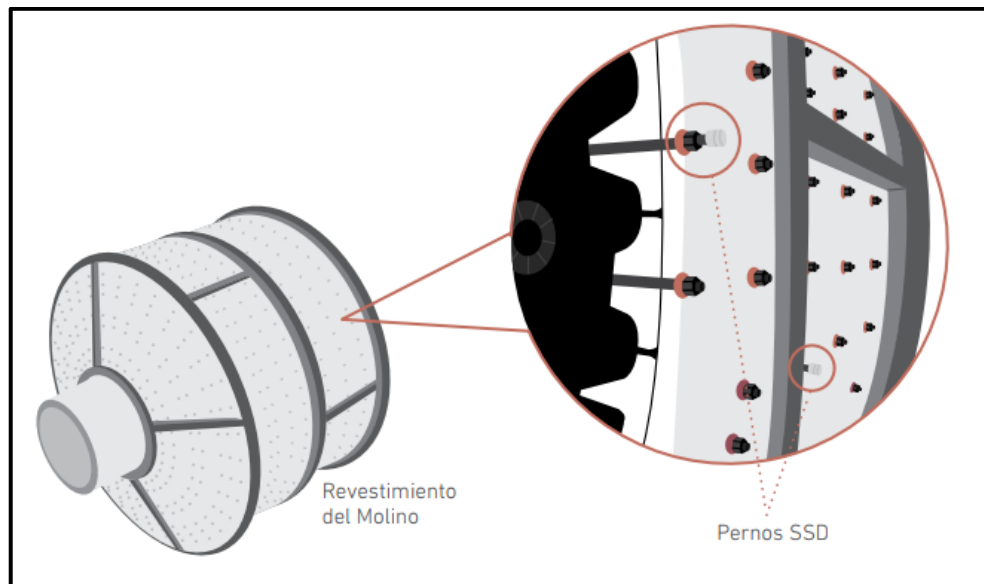
La investigación es valiosa debido a que demuestra la importancia del monitoreo continuo del desgaste de revestimientos y el valor de llenado para la optimización del procesamiento de minerales.

- **Fundación Chile (2016) “Casos de innovación de proveedores en la minería chilena”** (Fundación Chile, 2016). Caso de Innovación 03 / HighService Technology

Del documento se destaca la solución de la compañía HighService llamado sistema sensor de desgaste (SSD). El sistema SSD es una tecnología que permite realizar una transmisión en tiempo real para medida de las alturas remanentes en los revestimientos de molinos. Como se aprecia en la Figura 6, el sensor se instala en los pernos de sujeción y el cabezal transmite la información a un panel de control para difusión de los valores a las plataformas web.

Figura 6

Instalación de sistema SSD de HighService Corp.



Nota: fuente Casos de innovación de proveedores en la minería chilena (Fundación Chile, 2016)

La solución del sistema SSD es un antecedente que demuestra la importancia de obtener mediciones continuas y puntuales del desgaste en los revestimientos sin exponer a riesgos al personal involucrado en los trabajos de inspección.

- **Kingdon G. (2015) “The eyes have it: Mejorando la disponibilidad del molino a través de tecnología visual”** (Kingdon, 2015)

El artículo de investigación desarrolla el concepto de un sensor visual en tiempo real para observar la condición de la carga y los revestimientos en un molino SAG operando, además de complementar la medida de los revestimientos mediante pernos inteligentes para obtener espesores remanentes de trabajo. El sistema instala una cámara infrarroja de alta resistencia en la estructura de ingreso de mineral (ver Figura 7) y transmite las imágenes a través de un tablero de control a una computadora en la sala de procesos.

Figura 7

Cámara MCU e iluminación instalados en la estructura de alimentación de mineral



Nota: fuente The eyes have it: Mejorando la disponibilidad del molino a través de tecnología visual (Kingdon, 2015)

Los resultados aportan imágenes en tiempo real que se complementan con inspecciones continuas para obtener perfiles completos de desgaste. El sistema demuestra la importancia de mantener un monitoreo continuo de la trayectoria interna de la carga y su impacto en los revestimientos.

1.4.2 Investigaciones nacionales

- **Delgado Juan (2019) “Sistema de monitoreo en línea del desgaste de los revestimientos en los molinos convencionales de la unidad minera Uchucchacua”**

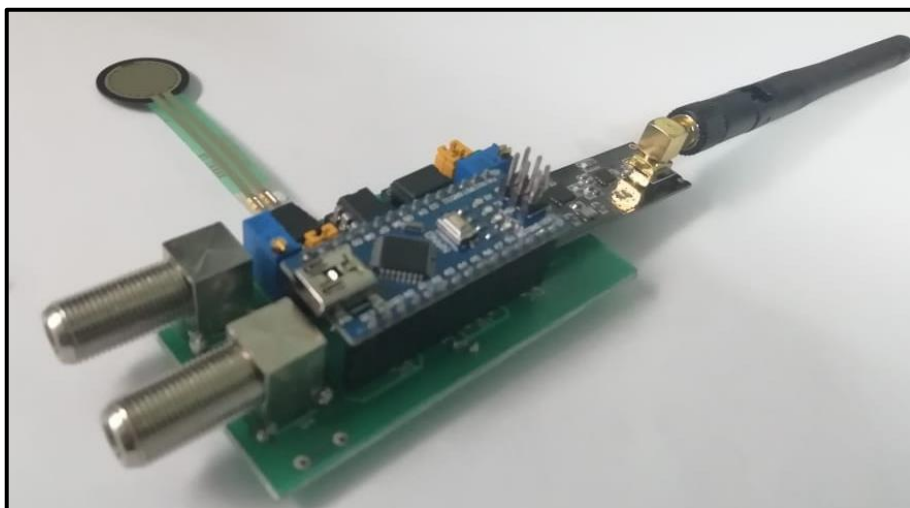
La tesis propone un sistema de control y monitoreo en tiempo real para la medida de desgaste de revestimientos de molinos SAG a través de la aplicación de sensores de fuerza para registrar la cantidad y magnitud de impactos que se aplican sobre los revestimientos.

La solución muestra la instalación de un sistema que desarrolla un componente mecánico que permite reducir las grandes fuerzas de impacto para transmitir la energía a

sensores piezoeléctricos que enviarán una señal y será procesada por microcontroladores con componentes eléctricos instalados en una placa matriz (ver Figura 8).

Figura 8

Diseño de sistema eléctrico de procesamiento de señales de sensor piezoeléctrico



Nota: fuente Sistema de monitoreo en línea del desgaste de los revestimientos en los molinos convencionales de la unidad minera Uchucchacua (Pomachagua, 2019)

La tesis muestra el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas para medir el revestimiento de manera indirecta mediante datos de impacto en los revestimientos y el modelamiento de ecuaciones que cuantifiquen el desgaste de los mismos. Se demuestra la importancia de conocer, mediante un sistema de medición en tiempo real, las fechas de cambio de los revestimientos que permitan una mejor programación y planificación de paradas de planta.

1.4.3 Investigaciones locales

- **Barrera Daniel (2021) “Diseño de un estimador de desgaste para revestimientos en molinos SAG utilizando modelamiento ANFIS”**

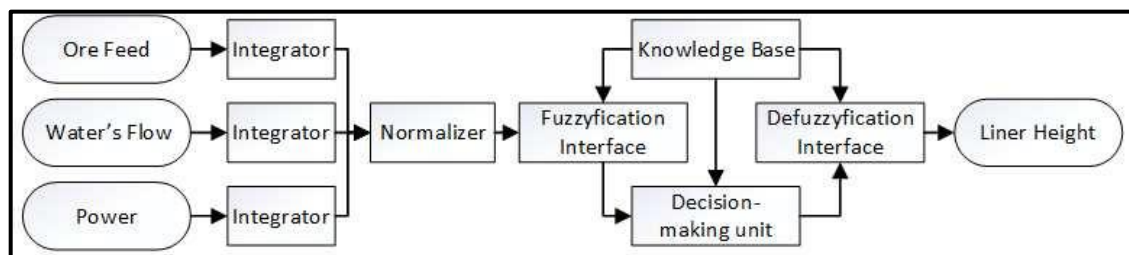
El paper de investigación desarrolla la implementación de un sistema de inferencia neuro-difuso adaptativo (ANFIS) para modelar un estimador de desgaste de revestimientos instalados de molinos SAG. El proceso de análisis consta de entrenar una red donde a

partir de diferentes configuraciones se obtienen los indicadores más adecuados de medición. La data de alimentación al sistema fue obtenida con valores reales de una operación minera registrado en un sistema SCADA y también valores de altura remanente y desgaste reales medidos periódicamente durante 3 campañas de revestimientos instalados en las zonas del lifter de cilindro.

Se propusieron diferentes métodos de modelamiento ANFIS donde el resultado de cada regla es una combinación lineal de los variables de ingreso sumado de un valor constante. El método con mejores resultados correspondió a un modelamiento que tuvo como variables de ingreso para el entrenamiento a los parámetros de alimentación de mineral, flujo del agua y la potencia (ver Figura 9).

Figura 9

Método diagrama de bloques neuro-difuso



Nota: fuente Diseño de un estimador de desgaste para revestimientos en molinos SAG utilizando modelamiento ANFIS (Barrera, Cerrillo, Gongora, Yance, & Orellana, 2021)

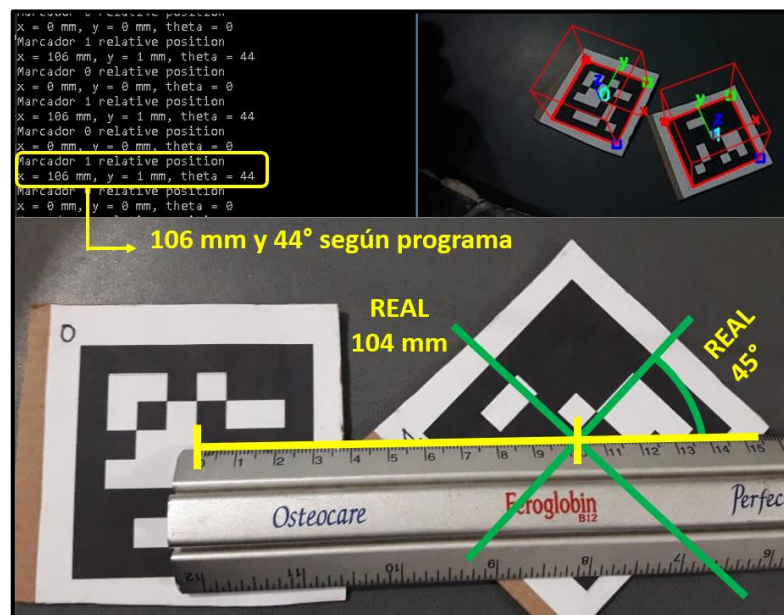
Los resultados de la investigación demostraron que aplicando el modelamiento ANFIS en un estimador neuro-difuso se logra obtener valores de error cuadrático bajos comparados con otros métodos para obtener la medición del desgaste de los revestimientos.

- **Diaz Rodrigo (2019) “Desarrollo de un sistema de localización de bajo costo para vehículos de guiado automático basado en detección de marcadores de referencia”**

La tesis propone un sistema de localización para vehículos de guiado automático desarrollado en base a la detección de marcadores de referencias instalados en su superficie y la estimación de ubicación a partir de la detección de las características de cada referencia. La investigación incluye la información de coordenadas de posición de cada vehículo que es comunicado a través de un protocolo TCP integrado a los procesos industriales de aplicación. Se demostró la efectividad del sistema de localización a partir de la identificación de marcas referenciales contrastadas con mediciones mecánicas en un entorno de prueba para validar la correcta estimación de posición (ver Figura 10)

Figura 10

Comparativa de medición por visión computacional y mecánica



Nota: fuente Desarrollo de un sistema de localización de bajo costo para vehículos de guiado automático basado en detección de marcadores de referencia (Diaz, 2019)

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Proceso de Molienda

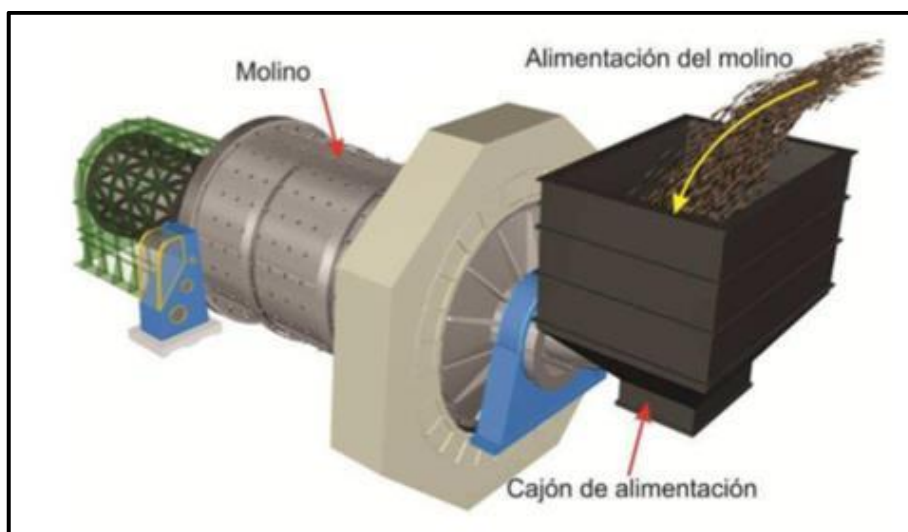
La molienda del mineral corresponde a la etapa donde se produce la reducción de tamaño de las partículas precedente del proceso de chancado y previo al de flotación. El objetivo de la etapa de molienda es reducir las partículas a un tamaño óptimo para su posterior procesamiento, lo cual envuelve aspectos técnicos y económicos (Berrios, 2012).

El proceso de molienda es ejecutado por molinos cilíndricos que giran en su eje axial para generar la conminución interna de las partículas a partir de los distintos métodos de fractura que se producen en el interior. Para estas aplicaciones existen distintos tipos de molinos específicos acorde con cada aplicación.

El flujo del mineral empieza por el transporte de las partículas a través que fajas transportadoras que desembocan en un chute de transferencia encargado de combinar el mineral con agua, reactivos y medios de molienda cuando corresponda para posteriormente transferir esta carga al molino cilíndrico por su zona de alimentación. La pulpa generada por las partículas ingresa al molino con energía acumulada (cinética y potencial) que es liberada al tener contacto con la zona interna del molino y convertida en dos formas de energía: energía de deformación por el impacto directo de la pulpa con la superficie interna del molino generando fractura de partículas y energía residual disipada en forma de calor (Pomachagua, 2019).

Figura 11

Proceso de alimentación en molino convencional



Nota: fuente Sistema de monitoreo en línea del desgaste de los revestimientos en los molinos convencionales de la unidad minera Uchucchacua (Pomachagua, 2019)

2.1.2 Historia de los molinos mineros

Los molinos cilíndricos fueron inventados en 1870 para la industria cementera debido a la alta producción que esta debía cubrir, donde los molinos de bolas fueron presentados rápidamente como el referente para molinos cilíndricos, siendo así luego aplicado en la industria del carbón. Desde inicios del siglo XX, la industria minera vio la necesidad de aplicar estos molinos giratorios en su proceso de conminución gracias al material fino que este entregaba en el circuito de molienda (Lynch, 2015).

Con las innovaciones que la electricidad brindó a las industrias, se pudieron fabricar motores con mayor capacidad para energizar molinos de grandes dimensiones.

Al 2021, el molino más grande del mundo de tamaño 8.5 x 13.4 m. (28'x44') pertenece a un proceso de molienda de cobre para una minera ubicada en el centro del Perú. En la Tabla 2 se muestra la evolución de la dimensión de los molinos acorde con el tiempo y las necesidades de las operaciones mineras.

Tabla 2

Incremento del tamaño de molino de bolas durante el siglo XX

AÑO	1909	1912	1927	1940	1963	1970	1990	1997	2012
Diámetro (m)	1.2	1.9	2.4	3.0	3.9	5.6	6.1	7.3	8.5
Longitud (m)	2.1	2.3	2.4	2.8	5.5	6.4	9.3	10.5	13.4
Potencia (kW)	11	41	168	447	1,491	3,169	5,593	10,440	22,000

Nota: fuente (Lynch, 2015) “Communiton Handbook”

Los molinos cilíndricos necesitan de medios de molienda que aporten a la trituración de las partículas hasta obtener el tamaño óptimo para el proceso. Cada tipo de medio de molienda es aplicado acorde con las necesidades de la operación minera y el tipo de molino donde será implementado. En las plantas mineras modernas los tipos de molinos más comunes son:

- Molino de barras

Los molinos de barras son molinos horizontales que procesan el mineral y reducen su tamaño mediante el uso de barras metálicas como medios de molienda. Estas barras deben cumplir un tamaño adecuado en su longitud y adecuado control de volumen de carga para evitar que se enmarañen durante el movimiento cilíndrico y que este efecto genere atoramiento al interior del molino con el mineral

El proceso de descarga en este tipo de molino se genera en su mayoría por el mecanismo de rebalse, donde el diámetro interno de la tapa de descarga es mayor al de la tapa de alimentación.

Usualmente el tamaño de alimentación para el mineral se encuentra en el rango de 15-25 mm y su reducción puede alcanzar partículas con tamaño de 1-2 mm en circuitos abiertos para molinos. Por esta característica de reducción de tamaño, son más aplicados en plantas procesadoras de baja capacidad (hasta 300 t/h) (Lynch, 2015).

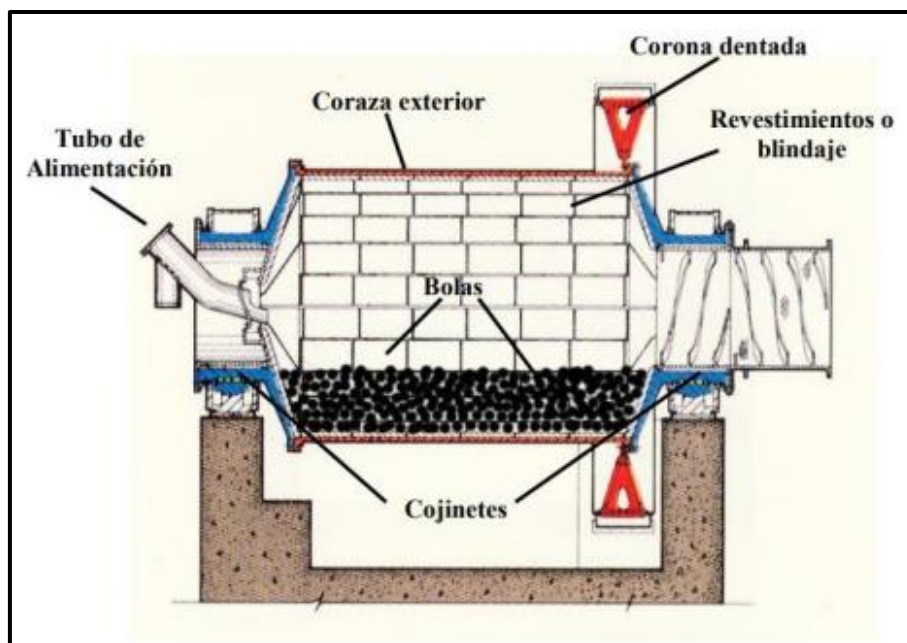
- Molino de bolas

Los molinos de bolas son molinos horizontales que se aplican en la última etapa del proceso de molienda en la planta concentradora. Debido a que existe un efecto de desgaste con las bolas de acero que este tipo de molino usa como medios de molienda, los minerales producidos de la conminución interna muestran pequeñas dimensiones que permiten pasar a los siguientes procesos de clasificación y separación.

Durante la evolución de las plantas de procesamiento, los molinos de bolas han ido orientándose al gigantismo alcanzando diámetros de 28'. Estos molinos son llenados en promedio al 35% de su capacidad total para aprovechar sus grandes dimensiones y poder procesar mayor tonelaje por hora.

Figura 12

Molino de bolas



Nota: fuente Sistema de monitoreo en línea del desgaste de los revestimientos en los molinos convencionales de la unidad minera Uchucchacua (Pomachagua, 2019)

- Molinos AG y SAG

El desarrollo de molinos de gran dimensión permitió la creación de molinos autógenos (AG) y semi-autógenos (SAG), donde el primer caso utiliza como medio

de molienda a su propia carga, mientras que el segundo utiliza como medios de molienda la combinación de bolas de acero y el mineral por sus grandes dimensiones al ingresar al molino.

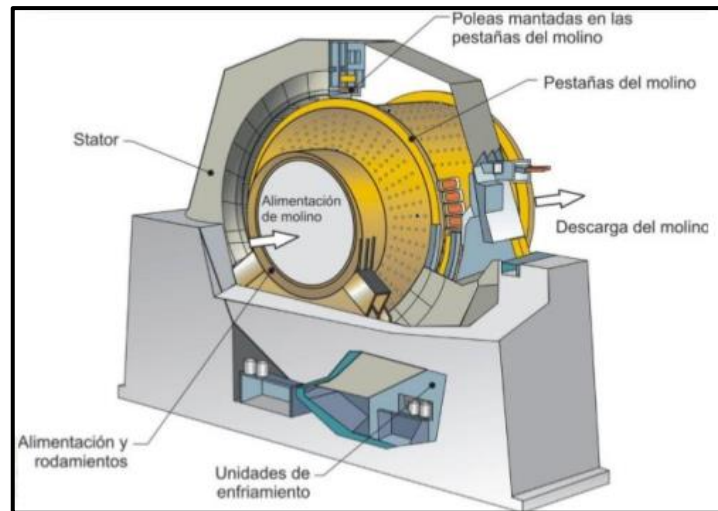
El sistema de conminución en estos tipos de molinos está basado en la generación de desgaste por abrasión entre minerales y medios de molienda y adicionalmente por impacto, ocasionado por el levante al interior del molino. Los molinos AG y SAG consideran por diseño un diámetro de mayor dimensión que su largo, caso contrario a los molinos de bolas y/o barras que poseen mayor longitud que diámetro en su estructura.

Su método de evacuación está constituido por un sistema de descarga que consta de revestimientos que seleccionan el tamaño de las partículas a evacuar por medio de agujeros. Este tipo de revestimientos son llamados parrillas y se complementan con cajones y conos de descarga que direccionan el mineral procesado hacia el exterior del molino.

En la etapa operacional, los molinos SAG tienen la capacidad de reemplazar las etapas de chancado secundario e inclusive terciario en las plantas procesadores, esto es posible por su distribución de medios de molienda (bolas de acero) que ocupan de un 12 a 18 % del nivel interior del molino y la carga del mineral desde un 8 a 12%. Siendo el total acumulado de ambos volúmenes de llenado desde 20 a 30% del volumen interno disponible del molino (Barrera Cuadros & Choque Uscamayta, 2020).

Figura 13

Molino SAG

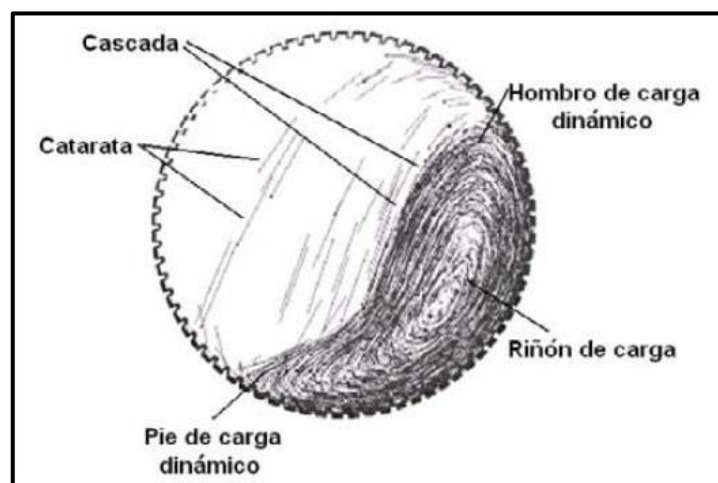


Nota: fuente Implementación de un plan de mantenimiento de cambio de liners de un molino SAG mill 40 ft x 25 ft (Barrera Cuadros & Choque Uscamayta, 2020)

El principio de conminución de los molinos cilíndricos yace en que el mineral es elevado durante el giro del molino por los revestimientos levantadores, por lo tanto, la energía es transmitida hacia el mineral, el cual a una altura determinada empieza a caer formando distintos movimientos de carga como la catarata, cascada y el riñón de la carga (ver Figura 14).

Figura 14

Movimiento interno de la carga en un molino



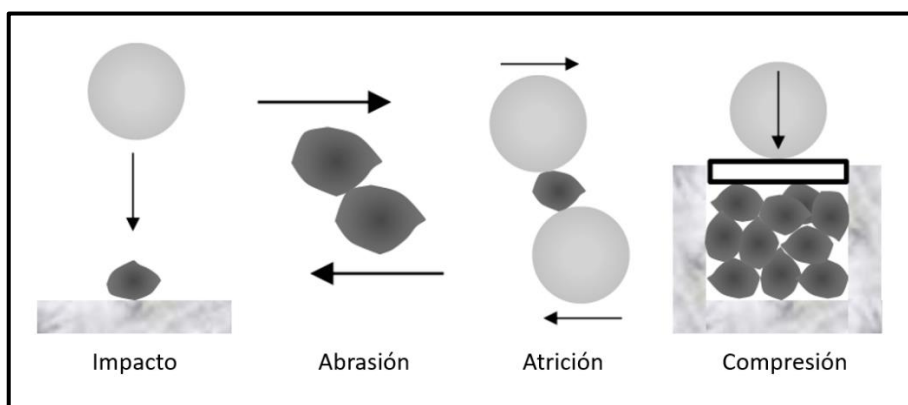
Nota: fuente Optimización de molinos Semi-Autógenos (Aguilar Titi, 2017)

El mineral empieza a separarse de la superficie de los revestimientos del molino en la zona del hombro de la carga dinámica proyectando su trayectoria hacia la parte baja del molino generando el pie de carga dinámico.

En las zonas de contacto entre la superficie de los revestimientos, el mineral y los medios de molienda se da el efecto de conminución. La mecánica de conminución presente en el molino se da mediante distintas fuerzas que quiebran al mineral, estas fuerzas mecánicas se dividen en impacto, abrasión, atrición y compresión (ver Figura 15).

Figura 15

Mecanismos de conminución de partículas



Nota: fuente Communion Handbook (Lynch, 2015)

Las principales fuerzas de abrasión y atrición se dan en la zona periférica del riñón dado que aquí es donde el mineral cuenta con mayor contacto con la superficie de los medios de molienda y los revestimientos. En la zona central del riñón de carga, las partículas de mineral presentan menor velocidad de traslación respecto al resto de las zonas, por ende, aquí el mecanismo de conminución son las fuerzas de compresión, mientras que en la zona del pie de carga dinámico dominan las fuerzas de impacto por la caída del mineral y medios de molienda por el efecto de movimiento en forma de catarata.

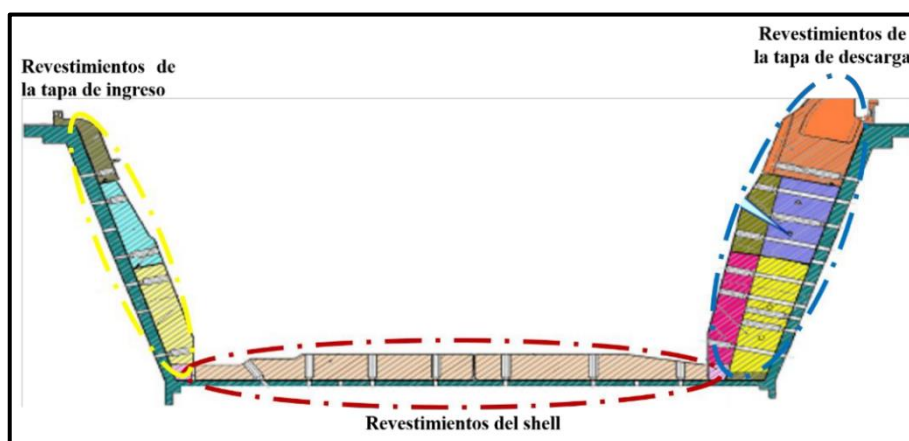
Los mecanismos de conminución se presentan en molinos de distintos tamaños, por lo que el mercado identificó la necesidad de procesar mayores cantidades de mineral para una producción efectiva.

2.1.3 Revestimientos de molinos mineros

Los revestimientos de los molinos cumplen la labor de transmitir la energía del motor eléctrico hacia el mineral, esta transmisión aparece por medio de los revestimientos levantadores que se encargan de elevar la carga de mineral hasta una altura donde se separa de la superficie y por la gravedad cae hacia el pie del molino produciéndose la conminución por el movimiento de la carga generado dentro del molino (ver Figura 16).

Figura 16

Revestimientos internos de un molino SAG



Nota: fuente Sistema de monitoreo en línea del desgaste de los revestimientos en los molinos convencionales de la unidad minera Uchucchacua (Pomachagua, 2019)

Asimismo, los revestimientos protegen de daños por desgaste e impacto a la estructura del molino, el cual, de no tener este sistema de protección, afectará la integridad estructural hasta su inoperatividad. Adicionalmente, la geometría de diseño que presentan los revestimientos ayuda a la transferencia del flujo del mineral dentro del molino, permitiendo así que las partículas de mineral con tamaño de partículas, ya reducido a valores requeridos por la operación minera, puedan ser removidas eficientemente por la zona de descarga del molino.

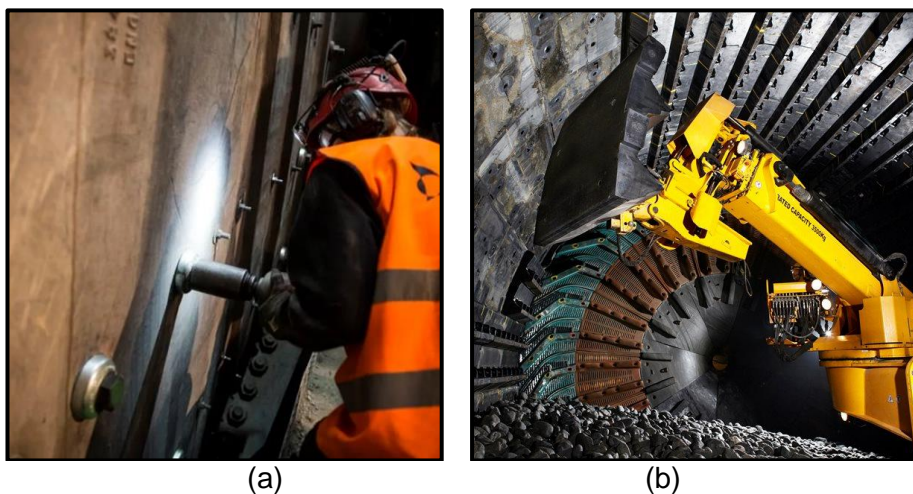
Los revestimientos son diseñados de acuerdo con el proceso del cual pertenece el molino y sus principales características a trabajar en su creación se basan en su geometría

y material. Las geometrías de los revestimientos cuentan con una amplia gama de opciones que se adecuen mejor al procesamiento y a la vida útil esperada del revestimiento, los principales parámetros de diseño a considerar en la geometría son: Altura y ancho del revestimiento levantador, altura y ancho del revestimiento placa, ángulo, altura y área de levante, área y volumen libre, cantidad de piezas, etc.

En el caso de los materiales a instalar en los revestimientos, son dos los que predominan en la manufactura, el acero y el caucho. Los tipos de acero son: Acero fundido con distintas aleaciones como alto cromo o cromo-molibdeno o aceros laminados con distintas durezas, y los tipos de caucho son: natural y sintético. Adicionalmente, en la actualidad se están impulsando los revestimientos híbridos, los cuales son una combinación de acero con caucho para aprovechar las ventajas anti-desgaste del acero y el menor peso y elasticidad que ofrece el caucho. Un ejemplo de este tipo de revestimientos son los ofrecidos por el mercado orientados al gigantismo y la sujeción externa, los cuales demuestran las ventajas de tener revestimientos híbridos en molinos de gran dimensión, menores tiempos de instalación y mayor seguridad en el trabajo gracias a su sistema de sujeción externo que evita a los operadores mecánicos a exponerse dentro del molino en los trabajos de instalación (ver Figura 17).

Figura 17

a) Sistema de sujeción externo. (b) Instalación de revestimientos híbridos Megaliner



Nota: fuente Megaliner™ Mill Liners (Metso:Outotec, 2021)

2.1.4 Tecnologías de monitoreo de desgaste

El monitoreo continuo del estado de los revestimientos instalados en los molinos es un trabajo importante a realizar de manera frecuente (preferentemente con frecuencia mensual o bimensual para molinos SAG) para analizar el desempeño actual de los revestimientos y validar las fechas de futuras detenciones para el mantenimiento predictivo del equipo.

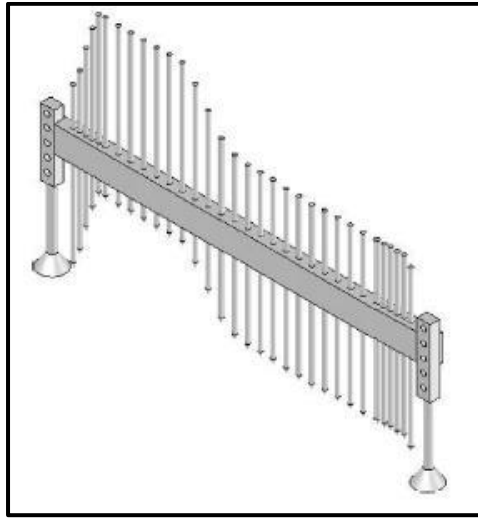
Los trabajos de inspección y monitoreo se realizan in-situ cuando el molino se encuentra detenido por trabajos de parada de planta y luego de ejecutar un procedimiento que permita el ingreso del personal capacitado responsable de las tareas. Cada unidad minera trabaja con procedimientos distintos para inspección de los molinos; sin embargo, todos cuentan con enfoque primordial en la seguridad de los inspectores que trabajarán dentro del molino respetando las normativas de seguridad del país donde se encuentre la operación minera.

Con el objetivo de mantener un monitoreo continuo de los revestimientos, las operaciones mineras utilizan distintos tipos de procesos de inspección de revestimientos, donde cada uno cuenta con diferente tipo de tecnología y, por ende, brinda resultados distintos en parámetros de precisión, tiempo de ejecución y personal involucrado en el trabajo. Se describen los cuatro procesos de inspección más comunes para medir el desgaste de los revestimientos aplicados en las operaciones mineras:

- **Inspección manual:** Consiste en la aplicación de herramientas mecánicas manuales para la medición del desgaste de revestimientos, una herramienta principal es la peineta de medición, que consta de una estructura de aluminio con agujas que grafican el perfil externo del levantador al superponerlo (ver Figura 18).

Figura 18

Peineta de medición



Nota: fuente Desarrollo de un modelo predictivo para estimar la tasa de desgaste en los revestimientos de un molino SAG en función de sus variables operacionales (Urrutia Cantillano, 2018)

La medida del revestimiento levantador realizado con la herramienta peineta de medición debe ser complementada con medidas de alturas remanentes en las placas de los revestimientos para analizar una medida completa, esta medida de placas se realiza con las herramientas mecánicas de punzón y taladro o clavo y martillo, el objetivo es penetrar la placa con el clavo o punzón para medir la altura excedente de los mismo y calcular las alturas remanentes de las placas.

Este proceso requiere una terna de inspectores altamente capacitados dado que la aplicación de herramientas mecánicas manuales demanda de capacitaciones para su correcta implementación.

Los resultados de este proceso tienen una precisión aproximada de ± 13 mm. con un trabajo de inspección de 30 minutos para inspeccionar los 12 revestimientos más importantes del molino SAG (Dandotiya, 2011).

- **Inspección por Ultrasonido:** Se realiza mediante la aplicación de un sensor por ultrasonido que mide las distancias en las que las ondas ultrasónicas viajan a través de un material previamente calibrado. Las ondas ultrasónicas atraviesan el cuerpo a medir hasta detectar el cambio de material y retornar al sensor, con la velocidad de transmisión del sonido por cada material y el tiempo de rebote de las ondas ultrasónicas, el equipo es capaz de brindar resultados de espesores.

Para una correcta medición con esta herramienta, se debe verificar que la zona a medir no se encuentre empolvada o cubierta con mineral de procesamiento, debe realizarse sobre una superficie limpia, plana y lisa para la correcta aplicación del sensor palpador ultrasónico, además se debe considerar que la zona a medir debe tener un perímetro paralelo porque las ondas ultrasónicas requieren esta condición para su rebote perpendicular y por ende, una correcta lectura de resultados en las mediciones (ver Figura 19).

Figura 19

Control de desgaste de revestimiento con ultrasonido



Nota: fuente Modelo matemático para la estimación de la vida útil de revestimientos en molinos semi-autógenos (Noriega Fernandez, 2006)

- **Inspección por escáner láser:** Este proceso de inspección utiliza la herramienta de escáner láser 3D posicionado dentro del molino (ver Figura 20). La tecnología del escáner 3D aplica el principio del rebote de láser sobre las superficies para calcular las distancias desde el centro hacia una coordenada específica, el giro en dos grados de libertad permite que los láseres sean disparados sobre todo el interior el molino generando una nube de puntos 3D digital que luego es procesada para analizar el desgaste.

Para la aplicación del escáner láser 3D, el molino debe cumplir con condiciones internas adecuadas (cantidad de vapor de polvo, nivel de agua, altas temperaturas) debido a que los láseres disparados por el escáner ven alterados sus resultados de no implementarse correctamente.

Este proceso de inspección se complementa con implementación de softwares de ingeniería inversa para el análisis de la nube de puntos medidos e identificar las desviaciones que representan las zonas con mayor desgaste focalizado.

El trabajo de inspección requiere de dos inspectores para la instalación del equipo dentro del molino y el tiempo de solo escanear el molino toma 5 minutos, sin considerar el ingreso y salida del molino (Dandotiya, 2011).

Figura 20

Escáner láser 3D FARO



Nota: fuente Faro Focus Laser Scanner (Faro Technologies, Inc, 2021)

2.1.5 Dron

El dron es un vehículo identificado también como Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) que se transporta mediante vuelos sin tripulación con la opción de ser conducido por un piloto de forma remota o con la opción de tener un vuelo autónomo programado a partir de sensores de ubicación y actuadores de dirección.

Los drones son aplicados en los sectores civil, industrial y militar donde los distintos tipos de diseños equipados con sensores instalados en cada vehículo desempeñan un servicio a medida basado en el objetivo de los usuarios y estos deben cumplir normativas del país donde se ejecute su sobrevuelo.

- **Tipos de Dron:** Acorde con sus parámetros de diseño los drones pueden clasificarse según su método de control y según su tipo de vuelo (ver Tabla 3):

Tabla 3

Clasificación de tipos de dron

Según método de control	Según tipo de vuelo
Autónomo	Ala fija Multirrotores Híbridos
Monitorizado	
Supervisado	
Pre-programado	
Controlado remotamente	

Nota: fuente (Confederación Regional de Organizaciones Empresariales de Murcia (CROEM), 2018) Uso de drones aplicado a la prevención de riesgos laborales

- **Drones en Perú:** En el país del Perú los drones están identificados como aeronaves pilotadas a distancia (RPA, por sus siglas en inglés) y están sujetos a la legislación aeronáutica del Perú. Por lo que su aplicación por cualquier persona u organización debe cumplir los procesos de registro, acreditación del piloto y solicitud de permisos para sobrevuelo acorde con la “Ley que regula el uso y las operaciones de los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS)” (El Peruano, 2018).

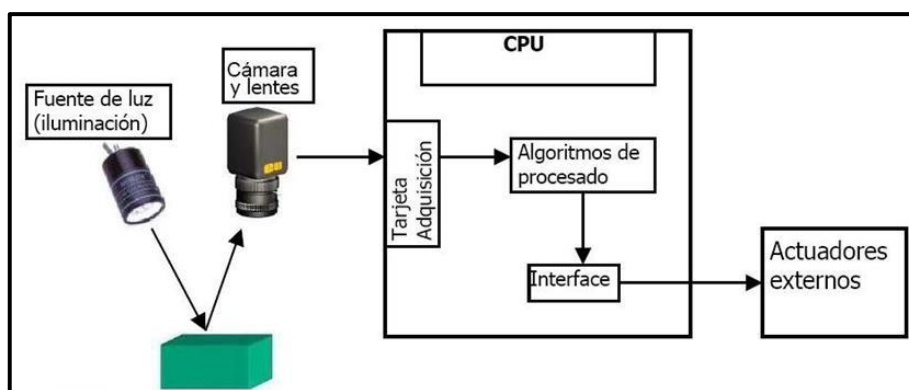
2.1.6 Visión Artificial

La visión artificial, también identificada como visión por ordenador, es el área científica que se encarga de registrar, procesar y analizar información del mundo real a partir de imágenes digitales capturadas con equipos electrónicos mediante fotos y/o videos digitales. La aplicación de esta tecnología permite que una central de procesamiento pueda analizar el entorno registrado en tiempo real o con un banco de registros obteniendo resultados numéricos que se plasman en un registro para obtener conclusiones de lo que acontece en el ambiente de estudio.

La visión artificial se aplica mediante un sistema completo que está conformado por cámaras, lentes, fuentes de iluminación, procesadores, sistemas de comunicación y actuadores (ver Figura 21).

Figura 21

Sistema de visión artificial



Nota: fuente Prototipo de un sistema mecatrónico para el posicionamiento y apilamiento automático de envases plásticos de cuatro litros empleando visión artificial en el sector manufacturero (Contreras , 2019)

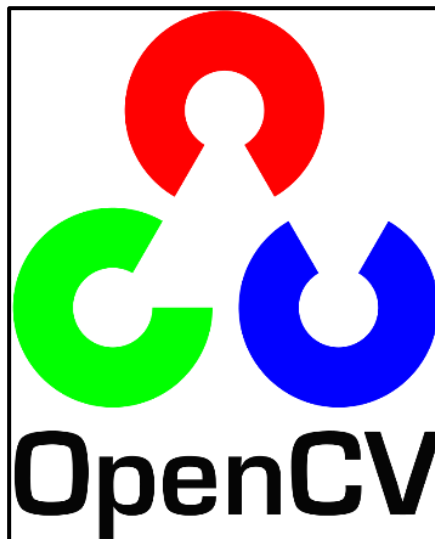
2.1.7 Open CV

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) es una librería de código abierto para utilizar funciones de visión computacional y aprendizaje automático. Esta librería es aplicable en los lenguajes de programación de C++, Python, Java y Matlab y en los sistemas operativos de Windows, Linux, Android y Mac OS (OpenCV, 2023)..

OpenCV fue desarrollado con el objetivo de proveer una infraestructura accesible para aplicaciones con visión artificial e impulsar el uso de la percepción mediante máquinas para productos comerciales. Se han recopilado más de 2500 algoritmos optimizados para la detección y reconocimiento de rostros, identificación de objetos, análisis de videos y el comportamiento humano, seguimiento mediante cámaras, etc. Donde estos algoritmos están siendo aplicados alrededor del mundo en industrias, centros de investigación y gobiernos. (OpenCV, 2023).

Figura 22

Logo de OpenCV



Nota: fuente <https://opencv.org/about/> (OpenCV, 2023)

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Molino

Para el presente trabajo de suficiencia, el molino es un equipo electromecánico instalado en las plantas procesadoras de las operaciones mineras que realizan el trabajo de conminución de los minerales y se presentan en distintos tipos siendo los principales molinos SAG y de bolas.

2.2.2 Revestimiento

Para el presente trabajo de suficiencia, el revestimiento se refiere a las piezas consumibles que se instalan dentro de los molinos mineros para proteger la estructura interna y para transferir la energía de rotación al mineral para su proceso de conminución.

2.2.3 Espesor

Para el presente trabajo de suficiencia, el espesor es la dimensión del revestimiento que se medirá a través de los distintos procesos de inspección y cuyos valores indicarán la vida útil remanente de los revestimientos instalados.

2.2.4 Escáner

Para el presente trabajo de suficiencia, el escáner es la herramienta electrónica que realiza la medición de desgaste a través de la generación de nubes de puntos por el disparo de láseres en el entorno 3D.

2.2.5 Cámara

Para el presente trabajo de suficiencia, la cámara es el dispositivo electrónico para registrar y transmitir imágenes estáticas o en movimiento, en formato digital.

2.2.6 Confinado

Para el presente trabajo de suficiencia, el término confinado se refiere a un espacio cerrado con limitantes en su ingreso, no apto para permanecer en su interior por largos periodos y considerado como zona de riesgo para los colaboradores involucrados.

2.2.7 Seguridad

Para el presente trabajo de suficiencia, el término seguridad se refiere a la ausencia de peligro que bajo una probabilidad se pueda materializar en un riesgo que provoque daños a las personas, bienes o el entorno.

Capítulo III. Hipótesis y operacionalización de variables

3.1 Hipótesis general

H1: El diseño de un algoritmo de visión artificial para referenciar la trayectoria de vuelo de un dron influye en la mejora de la seguridad ocupacional en la inspección de revestimientos de molinos SAG de gran minería.

3.2 Hipótesis específicas

- El diseño de la trayectoria para un dron que optimice el ingreso al molino SAG de 40 ft. facilitará el acceso a áreas de difícil alcance, mejorando la eficiencia de la inspección.
- La implementación de un dron en la inspección de revestimientos de molinos SAG de gran minería, impactará en la seguridad de manera positiva respecto al procedimiento actual.

3.3 Operacionalización de variables

Las variables de la hipótesis que participan en la investigación son las siguientes:

3.2.1 Variable dependiente

V.D.1: Riesgos de exposición de inspectores en molinos SAG de gran minería.

3.2.2 Variable independiente

V.I.1: Diseño del algoritmo de visión artificial.

Capítulo IV. Metodología de la investigación

4.1 Tipo y diseño de la investigación

4.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación de este plan de trabajo de suficiencia profesional es tecnológico de nivel aplicativo debido a que cuenta como objetivo el aplicar conocimiento científico de tecnologías desarrolladas para disminuir los riesgos de personal en una zona de trabajo específico. Desde el punto de vista de las mediciones, será de nivel cuantitativo porque la investigación se fundamenta con los indicadores analizados de los análisis de trabajo seguro (ATS) registrado por trabajo. Asimismo, será cualitativo por los resultados característicos de desempeño de revestimiento a partir de resultados obtenidos en la medición.

4.1.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es experimental debido a que se busca evaluar como la optimización de un proceso de inspección incidirá en los indicadores al realizar el trabajo de recolección de datos.

4.2 Unidad de análisis

La presente investigación tiene como unidad de análisis un espectro de molinos SAG de gran minería instalados en 3 operaciones mineras nacionales con las siguientes características:

Tabla 4*Unidad de Análisis*

Ítem	Tamaño molino SAG	Ubicación	Tipo de minería	Condiciones ambientales
1	40'x25'	Cusco	Gran Minería	Gran Altitud/ Agreste
2	40'x25'	Apurímac	Gran Minería	Gran Altitud/ Agreste
3	40'x24'	Moquegua	Gran Minería	Gran Altitud/ Agreste

Nota: fuente Elaboración propia.

4.3 Matriz de consistencia

Título: “Diseño del algoritmo de visión artificial para un dron, para optimización del proceso de inspección de revestimientos y reducir riesgos de exposición a inspectores en molinos SAG de gran minería.”

Tabla 5

Matriz de Consistencia de la Investigación

PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS GENERAL	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES		INDICADORES	TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS
					DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE		
¿De qué manera los deficientes procesos de inspección de revestimientos de molinos SAG en gran minería influyen en la exposición a riesgos del personal involucrado durante la recolección de datos?	Mejorar la salud ocupacional en la inspección de revestimientos de molinos SAG en gran minería basado en el diseño de un algoritmo de visión artificial para referenciar la trayectoria del vuelo de un dron.	<ul style="list-style-type: none"> - Diseñar la trayectoria para el dron durante la inspección de revestimientos de molinos SAG en gran minería. - Evaluar el impacto del uso del dron en la seguridad de la inspección, contrastando con el procedimiento actual. 	El diseño de un algoritmo de visión artificial para referenciar la trayectoria de vuelo de un dron influye en la mejora de la seguridad ocupacional en la inspección de revestimientos de molinos SAG de gran minería.	<ul style="list-style-type: none"> - El diseño de la trayectoria para un dron que optimice el ingreso al molino SAG de 40 ft. facilitará el acceso a áreas de difícil alcance, mejorando la eficiencia de la inspección. - La implementación de un dron en la inspección de revestimientos de molinos SAG de gran minería, impactará en la seguridad de manera positiva. 	Riesgos de exposición de inspectores en molinos SAG de gran minería.	Diseño del algoritmo de visión artificial	Análisis de riesgo de exposición. Tasa de reconocimiento de datos de imágenes.	Análisis de trabajo seguro (ATS) Reporte de inspección de revestimientos Banco de imágenes de inspecciones (nube de puntos y fotografías)

Nota: fuente Elaboración propia.

Capítulo V. Desarrollo del trabajo de investigación

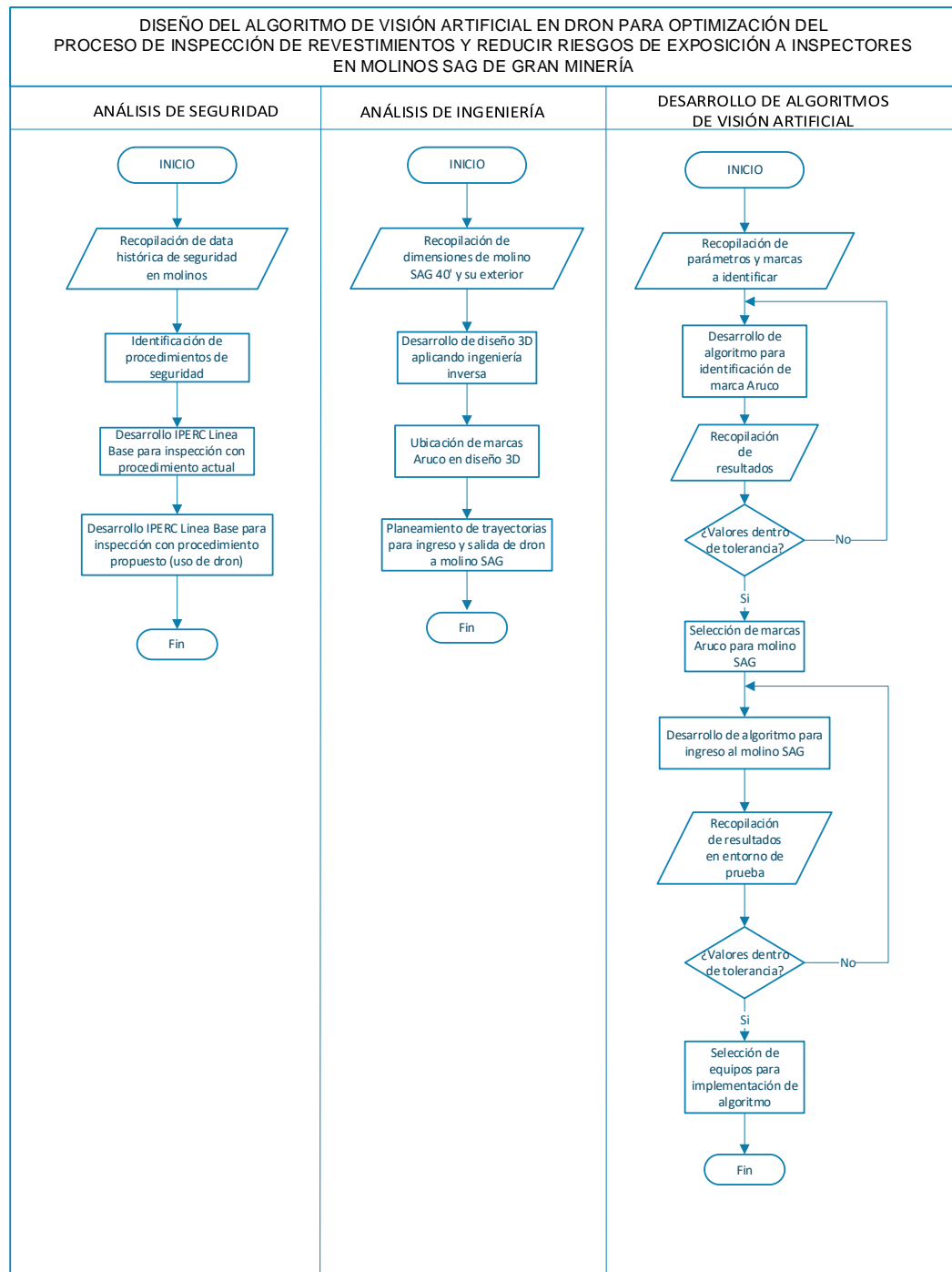
Los conceptos sobre los revestimientos de molinos y las tecnologías de monitoreo de su desgaste han sido definidos junto a ejemplos de distintas propuestas para el seguimiento de desempeño de producto.

Con la información recopilada, se procede al desarrollo del trabajo de investigación que se basa en la generación del algoritmo de visión artificial que informe la trayectoria requerida para el ingreso de un dron a molinos SAG de gran minería, permitiendo evaluar la mejora en la seguridad de los inspectores mediante la comparación del desarrollo del IPERC línea base y la matriz de riesgos que se utilizarán en el método convencional y en la propuesta de optimización.

Para estructurar de manera ordenada y detallada el desarrollo del trabajo de investigación, se dividió el análisis en tres secciones interrelacionadas, cada una complementando a la siguiente. Comenzando con el análisis de seguridad que tendrá como estándar al Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería del Perú (Ministerio de Energía y Minas, 2020). Luego, el análisis de ingeniería tendrá su desarrollo basado en las buenas prácticas de diseño CAD mediante escaneo 3D adquirido durante la experiencia laboral y, por último, el desarrollo de algoritmos de visión artificial estará basado en las buenas prácticas de programación mediante el uso de la librería OpenCV (OpenCV, s.f.).

Figura 23

Diagrama de flujo del desarrollo del trabajo de investigación



Nota: fuente Elaboración Propia

5.1 Análisis de seguridad

De acuerdo con el flujograma presentado, el desarrollo del trabajo de suficiencia profesional inicia con el análisis de seguridad del proceso actual para la inspección de revestimientos de molinos SAG en gran minería.

El trabajo de mantenimiento de los revestimientos en los molinos horizontales SAG es una tarea de crucial importancia, no solo desde un punto de vista operativo, sino también por las implicancias en seguridad que conlleva. Estos molinos presentan una serie de desafíos en su mantenimiento que exponen al personal operativo a condiciones potencialmente peligrosas. Estas condiciones han mostrado una tendencia preocupante de materializarse en eventos desafortunados, evidenciados por la ocurrencia de tres accidentes con consecuencias fatales entre los años 2000 y 2017 relacionados directamente a las actividades de mantención de revestimientos (Reventos Nuñez, 2020).

Asimismo, es esencial considerar la gran cantidad de eventos de menor potencial documentados con detalle en la Tabla 6 de la presente investigación tomando un ejemplo de molino en actividad actual, subrayando la necesidad de abordar con profundidad las prácticas y protocolos de seguridad en torno al mantenimiento de los revestimientos en los molinos horizontales SAG.

Tabla 6*Estadística de accidentes en cambio de revestimientos de minera Escondida*

Fecha	Clasif. Chile	Nivel Real	Nivel Prot.	Empresas Spot/Permanente	Diagnóstico
18-07-16	STP	1	1	Spot	Contusión palma
21-10-16	FATAL	4	4	Permanente	Fallecimiento
03-08-18	STP	1	1	Permanente	Lesión osteomuscular tobillo
24-10-18	CTP	3	3	Permanente	Osteomuscular mano izquierda
13-06-19	CTP	3	3	Permanente	Lesión osteomuscular
05-19-19	CTP	3	3	Spot	Mano derecha gravemente lesionada

Nota: fuente “Estudio de automatización del cambio de revestimiento de molinos”

(Reventos Nuñez, 2020)

La inspección de revestimientos en molinos implica que el personal capacitado se exponga a ciertos riesgos al entrar con equipos especializados para evaluar el desgaste. Una de las herramientas esenciales en este proceso es el uso de escáneres 3D para crear nubes de puntos. Estas se procesan para llevar un control del desgaste en las distintas campañas instaladas de cada zona del molino (Ccahuana Churata, 2018).

5.1.1 Seguridad en mantención de molinos horizontales

















Las regulaciones de seguridad de un país impactan directamente en las actividades mineras, definiendo criterios para proteger a los empleados y el medio ambiente. En Perú, la normativa que rige la seguridad y salud laboral en minería se basa en el DS 024-2016-EM, modificado por el D.S. N° 023-2017-EM (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2017). Su primer artículo enfatiza la prevención de

situaciones riesgosas, accidentes laborales y afecciones relacionadas con el trabajo, buscando fomentar una mentalidad de prevención de riesgos en el sector minero.

Bajo la normativa peruana, la actividad de inspección de los revestimientos de molinos SAG está considerada como trabajo de alto riesgo y es necesario la elaboración de un procedimiento escrito de trabajo seguro (PETS) (Barrera Cuadros & Choque Uscamayta, 2020). Este documento describe la información específica para desarrollar una tarea correcta de manera y segura desde el comienzo hasta el final. La Figura 24 muestra un ejemplo de PETS para el cambio de revestimientos en un molino SAG.

Figura 24

PETS para cambio de Revestimientos Interiores

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO DE SEGURO (PETS)		CÓDIGO: PETS	
Cambio de Revestimientos Interiores (Shell)		VERSIÓN: 0	
Molino SAG		PÁG.: 1	
ÁREA	Molienda	FRECUENCIA	Según demanda
EQUIPO (TAG)	Molino SAG (-----)	A EJECUTAR POR	Mantenimiento Mecánico
OBJETIVO	Realizar el CAMBIO DE REVESTIMIENTOS INTERIORES (SHELL) del Molino SAG de forma segura y eficiente, minimizando todo riesgo a las personas, daño a equipos e instalaciones, alteraciones al proceso productivo, respetando las normas de seguridad y medio ambiente de la empresa.		
ALCANCE	<p>El procedimiento establece los pasos a seguir para las actividades relacionadas con el CAMBIO DE REVESTIMIENTOS INTERIORES (SHELL) de los Molinos SAG y es aplicable, de forma obligatoria, a todo el personal de mantenimiento que participe en dicha labor.</p> <p>Las actividades desarrolladas en este procedimiento son:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Desmontaje de Chute de Alimentación al Molino SAG. - Desmontaje de Revestimientos Interiores (Shell). - Limpieza e Inspección. - Montaje de Revestimientos Interiores (Shell). - Montaje de Chute de Alimentación al Molino SAG. 	EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL <div>  CASCO SEGURO ANSI Z89.1  LENTES SEGURO ANSI Z87.1  ZAPATOS SEGURO ANSI Z41.1  ROPA TRAB NTP 241  GUANTES DE CUERO ASTM F496-06 </div> <div>  RESPIRADOR CARA COMPLETA 42 CFR 84  PROTECTORES AUDITIVOS ANSI S3.19  TRAJE SOLDADOR ANSI Z89.1 </div>	
ANÁLISIS DE PELIGROS / RIESGOS			
Consideraciones Generales	Actividades de Alto Riesgo (HHA)	Riesgos Asociados	
<ul style="list-style-type: none"> • Está Prohibido: <ul style="list-style-type: none"> - Operar equipos sin certificación. - Ingresar a trabajar a un equipo sin realizar el bloqueo y etiquetado respectivo. - Trabajar sin AST y permisos. • Es Obligatorio: <ul style="list-style-type: none"> - Hacer firmar AST y Permisos. - Usar EPPs completos. - Trabajar con supervisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Materiales Peligrosos • Trabajo en Caliente • Maniobras e Izajes Críticos • Lock Out – Tag Out • Espacios Confinados 	<div>  ASFIXIA  ATRAPAMIENTO  ATROPELLO  CAÍDAS AL MISMO NIVEL  CARGA SUSPENDIDA </div> <div>  CORTES Y GOLPES  INHALACIÓN DE GASES TÓXICOS  SOBRESFUERZO </div>	

Nota: fuente Implementación de un plan de mantenimiento de cambio de liners de un molino SAG mill 40 ft x 25 ft. (Barrera Cuadros & Choque Uscamayta, 2020)

Para desarrollar un PETS como el mostrado en la Figura 24, previamente se deben identificar los riesgos asociados al trabajo a realizar. Para esto, se aplica el IPERC (Identificación de Peligros, Evaluación y Control de Riesgos), el cual es un proceso sistemático y estructurado empleado para identificar, evaluar y controlar los riesgos asociados con las actividades laborales (Ministerio de Energía y Minas, 2020). Tiene como principal objetivo el garantizar la seguridad y salud de los trabajadores, así como la protección de los activos y el entorno laboral.

Por tanto, para la inspección de revestimientos de molinos horizontales se identificaron los riesgos de asfixia, atrapamientos, caídas al mismo nivel, cortes y golpes e inhalación de gases tóxicos.

5.1.2 Análisis de nivel de riesgo

En el marco del estudio del análisis del nivel de riesgo, se considera la jerarquía de control de riesgos para definir el orden y las prioridades a los controles para abordar y mitigar potenciales peligros en el entorno laboral (RIMAC, 2019).

Figura 25

Jerarquía de los controles de riesgo



Nota: fuente Rimac Riesgos laborales (RIMAC, 2019)

En este contexto, se elaboró la matriz IPERC línea base, específicamente diseñada para identificar y evaluar los peligros y riesgos intrínsecos en el proceso de inspección de revestimientos en molinos horizontales SAG.

Dentro de esta matriz, se proporciona una descripción exhaustiva de las actividades que se deben llevar a cabo, así como los procedimientos específicos a seguir durante la inspección. Además, se destacan y analizan los mecanismos de control que se encuentran actualmente en vigencia en las prácticas laborales relacionadas con dicha tarea.

Para conseguir una evaluación integral y precisa del riesgo asociado a cada peligro identificado, la matriz IPERC utiliza criterios basados en la severidad del potencial daño y la probabilidad de que dicho daño ocurra. A partir de esta evaluación, cada riesgo es clasificado dentro de una escala que determina si su nivel es Alto, Medio o Bajo. Esta clasificación permite a los encargados de la seguridad laboral implementar medidas de control adecuadas, priorizando aquellos riesgos que presenten una mayor urgencia o severidad.

En la Tabla 7 se desarrolló la identificación de peligros, evaluación de riesgos y medidas de control línea base para el proceso de inspección de revestimientos de molinos basado en el formato del anexo N°8 del reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería del Perú (Ministerio de Energía y Minas, 2020), la tabla original se muestra en el Anexo 1. La evaluación se llevó a cabo utilizando la metodología vigente para inspeccionar los revestimientos de los molinos, la cual requiere que el personal ingrese al molino para realizar la inspección con equipos como escáneres 3D, cámaras fotográficas y herramientas manuales.

Los resultados muestran que la actividad de inspección de revestimientos y sus respectivas actividades implican riesgos al personal que se encargará de realizar cada una de las tareas. Estos riesgos son mitigados mediante la implementación de

controles organizados por una jerarquía, lo cual contribuye a reducir la categorización de riesgo de cada tarea. A pesar de la implementación de los controles mencionados, es crucial destacar que el personal aún sigue expuesto a ciertos niveles de peligro, ya que los controles implementados se sitúan principalmente a nivel de barreras blandas. Estas barreras, aunque efectivas hasta cierto punto, no eliminan por completo el riesgo, sino que buscan minimizar la exposición del trabajador y reducir la probabilidad de incidentes.

Tabla 7

IPERC Línea Base para Inspección de molino SAG procedimiento actual

Logo Empresa		IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS, EVALUACIÓN DE RIESGOS Y MEDIDAS DE CONTROL - LINEA BASE												Código: FOR- Versión: 4 Fecha: Página 1 de 1				
Gerencia: Área: Fecha de elaboración: Fecha de Actualización:		Equipo Evaluador:												Jerarquía de Controles. Orden de 1 Eliminación 2 Sustitución 3 Controles de Ingeniería 4 Control Administrativo 5 EPP adecuado				
Proceso	Actividad	Tarea	Peligros	Riesgos	Evaluación de Riesgos			Jerarquía de Control				Reevaluación			Acción de Mejora	Responsable		
					Nivel Probabilidad (P)	Nivel Severidad (S)	Clasific. de Riesgo (PxS)	Eliminación	Sustitución	Controles de Ingeniería	Control Administrativo	EPP	Probabilidad (P)	Severidad (S)			Clasific. de Riesgo	
Inspección de Revestimientos	Preparación del molino	Retiro de chute	Manipulación de equipos pesados, espacios reducidos	Lesiones musculares, atrapamientos	D	3	17				Procedimientos de inspección de herramientas	EPP básicos y específicos de la tarea	D	4	21			
			Condiciones ambientales inadecuadas	Exposición a condiciones no aptas para el humano	E	3	20				Procedimientos de monitoreo de condiciones ambientales	EPP y uso de ropas específicas para tarea	E	4	23			
			Proyección de objetos	Caída de objetos sobre las personas	D	3	17					EPP, uso de careta y chaqueta protectoras	D	4	21			
		Desplazar chute de alimentación	Movimiento de equipos	Atropellamiento, colisiones	C	2	8				Procedimiento de delimitación de área de tránsito	EPP básicos y específicos de la tarea	C	3	13			
		Instalación de tapa de seguridad	Manipulación de herramientas	Golpes o cortes con herramientas	D	4	17					Uso de guantes anticortes	D	3	17			
		Instalación de plataforma para ingreso a molino	Manipulación de objetos	Atrapamiento, golpes	B	4	14					EPP básicos, uso de guantes anticortes	C	4	18			
			Ruido	Exposición a alto ruido	D	3	17					EPP básicos, uso de orejeras	D	4	21			
		Iluminación	Exposición a alta/baja iluminación	Lesiones por falta de visibilidad, tropezos	D	3	17					EPP básicos, uso de lentes oscuros y linternas	D	4	21			
	Acceso al molino	Ingreso de personal al molino	Espacios confinados, superficies resbaladizas, caídas a desnivel	Asfixia, caídas	B	3	9				Procedimiento de medición de gases	EPP's básicos, uso de medidor antigases	B	4	14			
	Inspección interna	Inspección de revestimientos	Superficie resbaladiza, explosión de bolas, sustancia químicas, cargas suspendidas, manipulación de objetos	Caídas, golpes, asfixia, cortes, atrapamiento	B	2	5					EPP's básicos, careta facial, chaleco de cuero, respiradores antigases y antipolvo	D	2	12			
			Exposición a superficies rugosas, bordes afilados	Cortes, abrasiones	B	4	14					EPP básicos, uso de guantes anticortes	C	4	18			
			Exposición a equipos electrónicos con láser	Lesiones oculares, electrocución	D	3	17					EPP's básicos, lentes protectores	D	4	21			
	Acceso a exterior	Retiro de personal del molino	Superficies resbaladizas a desnivel	Caídas	B	3	9					EPP's básicos	B	4	14			
	REVISADO POR:					Firma										Fecha		Firma

Nota: fuente Elaboración Propia

El análisis detallado del procedimiento actualmente adoptado para la inspección de revestimiento de molinos ha puesto de manifiesto la presencia de riesgos residuales, incluso a pesar de la implementación de diversas barreras de control. Estos riesgos residuales subrayan las limitaciones de las estrategias de mitigación actuales y resaltan la necesidad de explorar soluciones innovadoras que puedan ofrecer niveles adicionales de seguridad para los operarios involucrados en el proceso. En este contexto, es evidente que las medidas de control existentes, aunque son un paso crucial en la dirección correcta, aún dejan ciertos vacíos que deben ser abordados para garantizar una protección integral.

En este sentido, la presente investigación propone la introducción de un dron equipado con un escáner 3D y una cámara montada, capaz de identificar de manera autónoma la entrada del molino para acceder y llevar a cabo la inspección de los revestimientos. Esta innovación tecnológica no solo tiene el potencial de aumentar la precisión y eficiencia del proceso de inspección, sino que también minimiza la necesidad de que los trabajadores ingresen directamente al molino, disminuyendo su exposición a riesgos ocupacionales. Este avance nos acerca al nivel de sustitución en la jerarquía de controles, considerado uno de los métodos más efectivos para la gestión de riesgos laborales.

La implementación de esta tecnología pionera marca un progreso significativo en la evolución de las prácticas de seguridad dentro de la industria, estableciendo un nuevo estándar en la prevención de riesgos laborales. Al eliminar la necesidad de intervención humana directa durante la inspección de revestimientos, se protege al personal y se refuerza el compromiso con la creación de entornos de trabajo más seguros y saludables, un objetivo crucial en cualquier sector industrial.

En la Tabla 8 se realiza la evaluación del IPERC base (Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y Control) para el proceso de inspección de

revestimientos de molinos, incorporando en esta ocasión un procedimiento innovador que involucra el uso de un dron. También se añadió el análisis de riesgo relacionado con su uso. Con este método, se aprecia una mejora en la seguridad sustentado en los valores reevaluados y actualizados en la clasificación de riesgo dentro de la matriz IPERC. Es evidente que, al adaptar y mejorar nuestros procedimientos, podemos observar avances tangibles en la gestión y control de riesgos asociados al proceso de inspección de revestimientos.

Tabla 8

IPERC Línea Base para Inspección de molino SAG procedimiento con dron

Logo Empresa		IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS, EVALUACIÓN DE RIESGOS Y MEDIDAS DE CONTROL - LÍNEA BASE												Código: FOR- Versión: s Fecha Página 1 de 1			
Gerencia: Área: Fecha de elaboración: Fecha de Actualización:		Equipo Evaluador:												Jerarquía de Controles. Orden de 1 Eliminación 2 Sustitución 3 Controles de Ingeniería 4 Control Administrativo 5 EPP adecuado			
Proceso	Actividad	Tarea	Peligros	Riesgos	Evaluación de Riesgos			Jerarquía de Control					Reevaluación			Acción de Mejora	Responsable
					Nivel Probabilidad (P)	Nivel Severidad (S)	Clasific. de Riesgo (PxS)	Eliminación	Sustitución	Controles de Ingeniería	Control Administrativo	EPP	Probabilidad (P)	Severidad (S)	Clasific. de Riesgo		
Inspección de Revestimientos	Preparación del molino	Retiro de chute	Manipulación de equipos pesados, espacios reducidos	Lesiones musculares, atrapamientos	D	3	17				Procedimientos de inspección de herramientas	EPP básicos y específicos de la tarea	D	4	21		
			Condiciones ambientales inadecuadas	Exposición a condiciones no aptas para el humano	E	3	20				Procedimientos de monitoreo de condiciones ambientales	EPP y uso de ropas específicas para tarea	E	4	23		
			Proyección de objetos	Caída de objetos sobre las personas	D	3	17					EPP, uso de careta y chaqueta protectoras	D	4	21		
		Desplazar chute de alimentación	Movimiento de equipos	Atropellamiento, colisiones	C	2	8				Procedimiento de delimitación de área de tránsito	EPP básicos y específicos de la tarea	C	3	13		
		Instalación de tapa de seguridad	Manipulación de herramientas	Golpes o cortes con herramientas	D	4	17	Evitación de instalación de tapa de seguridad					E	5	25		
			Manipulación de objetos	Atrapamiento, golpes	B	4	14	Evitación de instalación de plataforma					E	5	25		
		Ruido		Exposición a alto ruido	D	3	17		Empleo de dron para ingreso a			EPP básicos y específicos de la tarea	D	5	24		
			Iluminación	Exposición a alta/baja iluminación	Lesiones por falta de visibilidad, tropiezos	D	3	17		Empleo de dron para inspección			E	5	25		
	Acceso al molino	Ingreso de personal al molino	Espacios confinados, superficies resbaladizas, caídas a desnivel	Asfixia, caídas	B	3	9		Empleo de dron para inspección				E	5	25		
	Inspección interna	Inspección de revestimientos	Superficie resbaladiza, explosión de bolas, sustancia químicas, cargas suspendidas, manipulación de objetos	Caídas, golpes, asfixia, cortes, atrapamiento	B	2	5		Empleo de dron para inspección				E	4	23		
			Exposición a superficies rugosas, bordes afilados	Cortes, abrasiones	B	4	14		Empleo de dron para inspección				E	5	25		
			Exposición a equipos electrónicos con láser	Lesiones oculares, electrocución	D	3	17		Empleo de dron para inspección				D	5	24		
			Uso de dron en inspección	Colisión, caída de objetos	C	5	22			Procedimiento de inspección con dron	EPP básicos y específicos de la tarea	D	5	24			
	Acceso a exterior	Retiro de personal del molino	Superficies resbaladizas a desnivel	Caídas	B	3	9		Empleo de dron para inspección				E	5	25		
	REVISADO POR:				Firma								Fecha				Firma

Nota: fuente Elaboración Propia

5.2 Análisis de ingeniería

Para la presente sección, se aborda un análisis de ingeniería de diseño centrado en un molino SAG para gran minería. El propósito de este análisis es obtener las dimensiones generales externas del molino, así como las especificaciones detalladas de la estructura en la zona de alimentación de flujo de mineral. Esta información resulta crucial para calcular el centro exacto de la zona de alimentación del molino, un dato vital para la operación planificada de trayectoria con el dron. Al disponer de estas mediciones y cálculos precisos, se sientan las bases para un procedimiento de inspección optimizado y seguro aplicando la visión computacional para la dirección de trayectoria, maximizando la eficacia del uso del dron en este contexto industrial.

El desarrollo de un diseño tridimensional (3D) del molino SAG es generado con el objetivo de obtener una representación precisa y detallada del equipo, para así permitir una evaluación exhaustiva de sus componentes y características estructurales que nos servirán para detallar la evaluación de posicionamiento mediante visión computacional.

A través del empleo del software de diseño asistido por computadora (CAD) Autodesk Inventor, se ha procedido a realizar un montaje virtual con las diversas componentes del molino, con el propósito de simular la región de alimentación de este de manera digital. Las dimensiones utilizadas para este montaje virtual hacen referencia a un molino SAG de 40 pies de diámetro y 24 pies de longitud, dimensiones extraídas y resumidas en la Tabla 9.

Tabla 9

Parámetros de molino SAG 40'x24'

Radio externo del molino	(m)	6.172
Radio interno del molino	(m)	6.096
Longitud interna del molino	(m)	7.315
Radio promedio de revestimientos de cilindro	(m)	5.964
Radio de trunnion	(m)	1.905

Nota: fuente Optimización de un sistema de giro para montaje de liners de un molino SAG 40 x 24 pies en una mina ubicada en Moquegua (Mallqui Antialon & Mallqui Antialon, 2022)

Con el objetivo de cumplir con las metas establecidas, se optó por complementar el diseño creado con herramientas CAD a través de la integración de dimensiones reales, las cuales se obtuvieron mediante un escaneo 3D realizado a un molino SAG 40'x25' ubicado en una instalación minera en la región sur de Perú que procesa cobre, ver Figura 26. Este método de digitalización en tres dimensiones permitió la captura precisa de las dimensiones y la forma exacta del molino en su exterior, brindando de esta manera un conjunto de datos veraces que fueron utilizados para validar y realizar ajustes al modelo 3D que se había elaborado con anterioridad.

El proyecto se benefició enormemente de la aplicación de la tecnología de escaneo 3D, no solo al proporcionar mediciones exactas, sino también al revelar características específicas y detalles constructivos del molino SAG y su entorno que previamente no eran visibles en los planos o la documentación técnica existente. Este grado de detalle fue extremadamente valioso para el equipo de diseño, ofreciendo una base robusta para llevar a cabo ajustes y mejoras en el modelo 3D. De este

modo, se aseguró que el diseño final del molino SAG en formato digital fuese una representación de utilidad para el análisis del proyecto, esta estrategia de integración entre el diseño asistido por computadora y el escaneo 3D permitió aumentar de la calidad y la confiabilidad del proyecto, apoyando la toma de decisiones informadas durante las etapas posteriores de ingeniería y análisis.

Figura 26

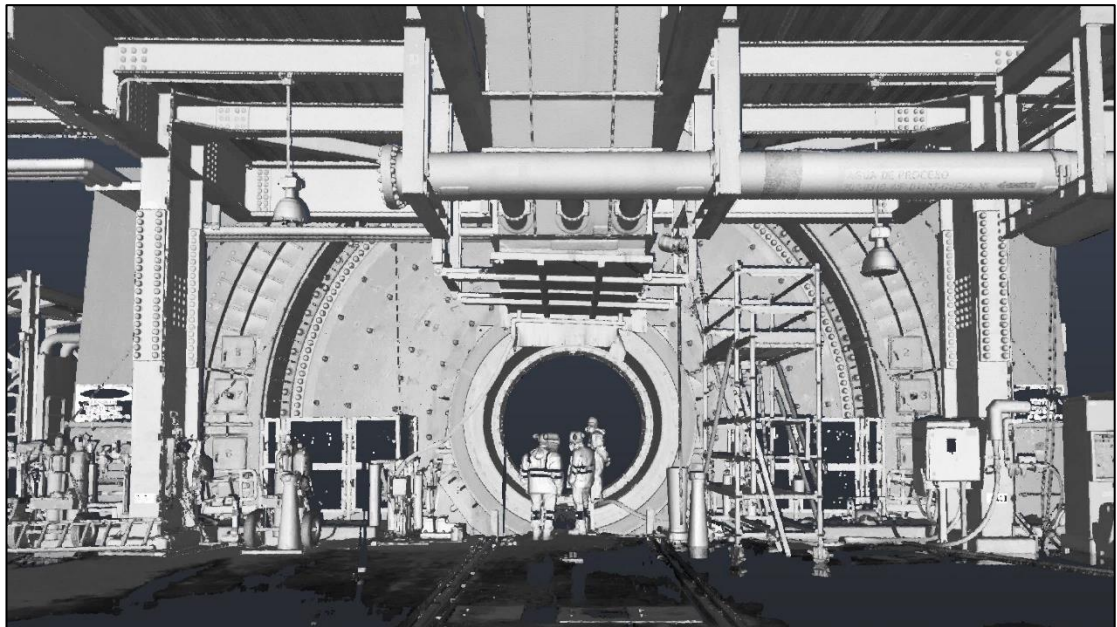
Zona exterior del molino



Nota: fuente Elaboración propia

Figura 27

Levantamiento de escaneo 3D en exterior de molino SAG

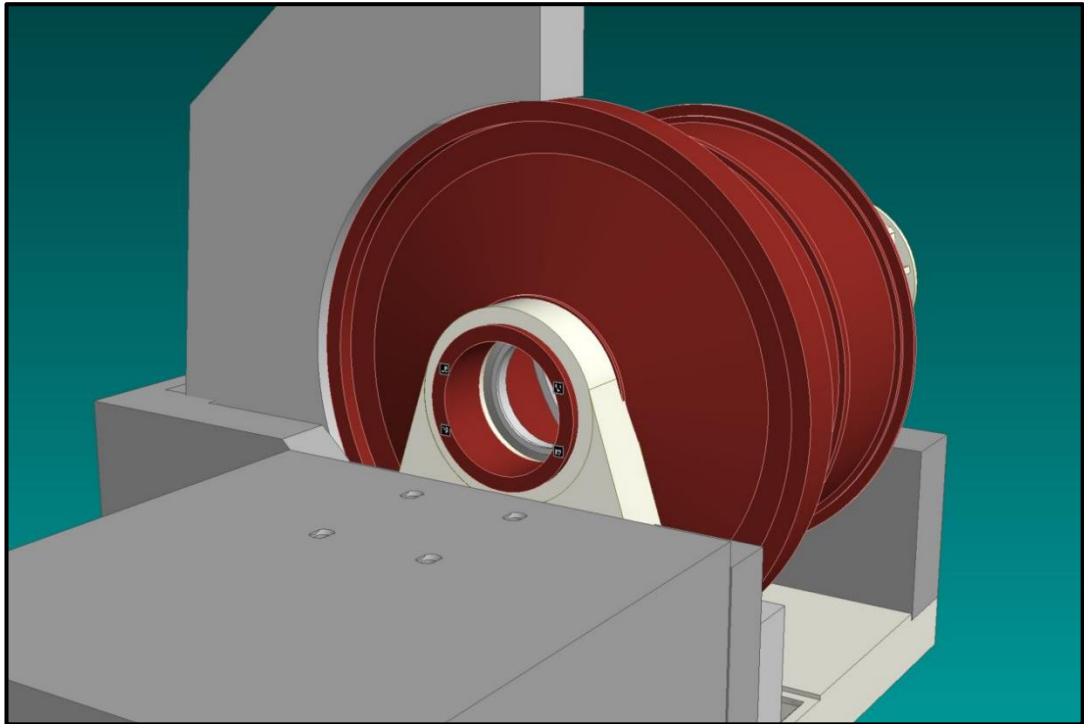


Nota: fuente Elaboración propia

La Figura 28 muestra la generación del diseño 3D concebido en base a los valores dimensionales y características descritas previamente. Las dimensiones generales del diseño 3D se muestran en el Anexo 2. Este diseño ha sido estructurado tomando como base el molino de referencia delineado en la sección anterior, y se ha enriquecido con representaciones de revestimientos y chumaceras referenciales, todo ello con la finalidad de configurar un sólido 3D de carácter conceptual. Este modelo permite llevar a cabo un análisis desde diversas perspectivas visuales de un molino SAG de 40 pies, posibilitando así la identificación precisa de la zona de ingreso destinada a inspección.

Figura 28

Diseño 3D del escenario de análisis



Nota: fuente Elaboración propia

El diseño conceptual propuesto emula la etapa de parada de planta y detención de procesamiento de mineral y apertura del ingreso al molino para la inspección de sus revestimientos. En este escenario, el molino SAG se encuentra inactivo, se ha retirado el chute de alimentación móvil y se ha preparado el entorno para permitir el acceso seguro del personal al interior del molino SAG para realizar las tareas de inspección.

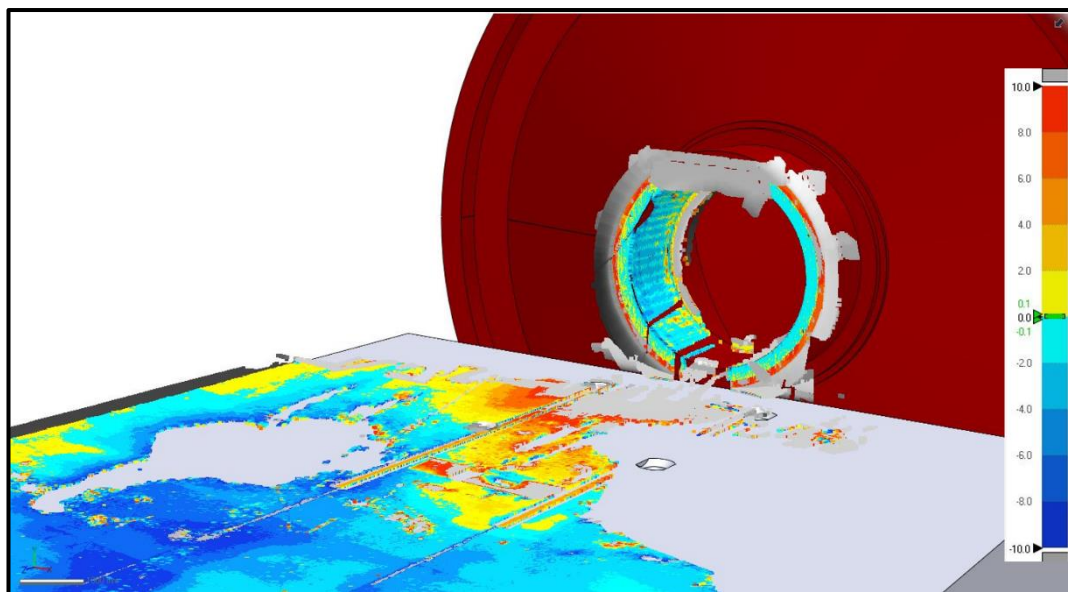
Las dimensiones cruciales dentro del diseño conceptual se centran en el diámetro interno del molino y el diámetro de entrada del trunnion de alimentación, ya que estos elementos definen el espacio disponible para trabajar durante la inspección interna del molino. Para comprobar las dimensiones de estas piezas, se realizó un análisis detallado del trunnion y la base de la planta utilizando la técnica de ingeniería

inversa. Este proceso implicó la comparación entre los modelos obtenidos a través del escaneo 3D del exterior del molino y los diseños dibujados en el software de diseño mecánico 3D. En la Figura 29 se observa el mapa de desviaciones que evidencia las diferencias dimensionales existentes donde la leyenda de colores muestra las desviaciones en milímetros, los resultados obtenidos demuestran que el diseño 3D conceptual tiene valores dimensionales notablemente similares a los del diseño original en el escaneo 3D.

El mapa de color muestra que la diferencia dimensional, en la zona interna del trunnion y la base del molino, se encuentra con valores aceptables dentro del rango de ± 2 mm., validando así el diseño conceptual 3D elaborado.

Figura 29

Mapa de desviaciones de zona de ingreso a molino



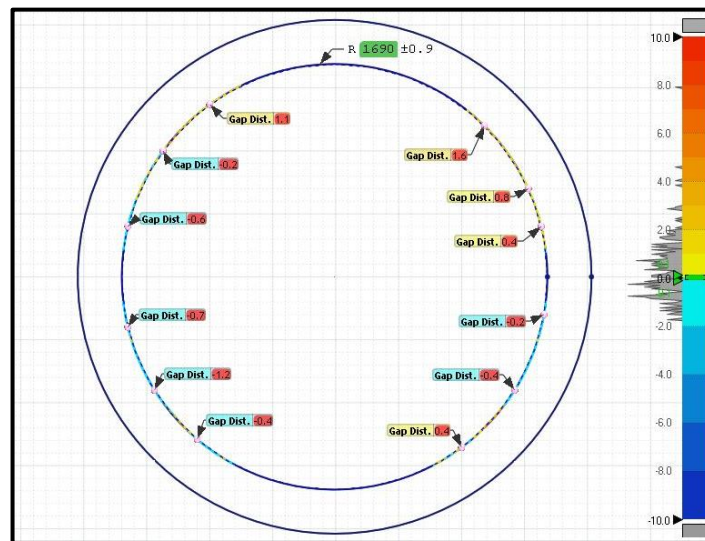
Nota: fuente Elaboración propia

En la zona media del trunnion se realizó un corte transversal para comparar el diámetro interno del mismo con el diseño 3D. La Figura 30 muestra que la diferencia dimensional entre el radio interno del escaneo y el radio del modelo 3D no

supera los 1.6mm, asimismo, se calculó un radio promedio de la zona interior de 1690 ± 0.9 mm. Esto representa un margen de error 0.09% para el diseño 3D modelado para el caso de estudio.

Figura 30

Corte transversal de trunnion



Nota: fuente Elaboración propia

Con el diseño 3D para la zona de análisis elaborado, se continúa el estudio elaborando una propuesta para mejorar la seguridad durante la actividad de inspección de revestimientos de molinos.

Conforme se destacó en el análisis de seguridad, la metodología actual para inspeccionar los revestimientos de un molino SAG implica que el personal especializado deba entrar en un espacio confinado, situación que se cataloga como un trabajo de alto riesgo.

La propuesta de optimización del proceso de inspección plantea el desarrollo de un algoritmo de visión artificial que permita el ingreso de un dron a un molino SAG a través de su trunnion de alimentación. El dron referencial propuesto está equipado con un escáner 3D para la lectura del desgaste de los revestimientos, con una

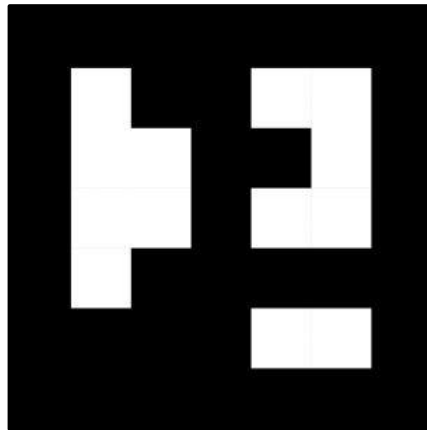
cámara IP para registrar imágenes de la posición inicial e identificación de las marcas de referencia de posición y con un procesador para analizar la información con el algoritmo del cálculo de la trayectoria que debe realizar el dron para su ingreso al molino.

Como se mencionó en secciones anteriores, las marcas pertenecientes a la librería Aruco desempeñan un papel fundamental como puntos de referencia para la realización de cálculos precisos de posición en la zona de ingreso al molino SAG, todo ello enmarcado dentro de un contexto de procesamiento de imágenes y aplicación de técnicas avanzadas de visión artificial. Estas marcas, por sus características únicas y fácil identificación por parte de los sistemas de visión por computadora, permiten una detección y seguimiento precisos, facilitando así la obtención de datos espaciales fiables.

Las marcas Aruco serán instaladas en la parte exterior del molino en la periferia de la entrada por el trunnión de alimentación, su ubicación estratégica ha sido elegida con el propósito de maximizar la eficiencia en la captura de datos y asegurar una integración óptima con los sistemas de visión artificial implementados. Al tener una visibilidad clara y directa de la marca, se facilita el proceso de cálculo de posición, garantizando así resultados precisos y confiables que son esenciales para el éxito de la investigación y la validez de los análisis realizados. La Figura 31 muestra un ejemplo de marca Aruco obtenida en su librería.

Figura 31

Marca Aruco 6x6_1000-13



Nota: fuente “Aruco marker generator” (Kalachev, 2023)

El repertorio de marcas Aruco incluye cientos de patrones distintos que están disponibles para ser utilizados como puntos de referencia para el posicionamiento. Para el desarrollo de la presente investigación, las marcas seleccionadas se eligieron basándose en una serie de pruebas enfocadas en aplicaciones que requieren identificación a distancias considerables, lo cual se detalla en la sección subsiguiente dedicada al desarrollo del algoritmo de visión artificial.

Las marcas Aruco, que serán instaladas en la parte externa del molino, en conjunción con técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes, proporcionarán resultados precisos respecto a la distancia y la ubicación referencial de la marca en relación con la posición de la cámara, tomando en cuenta sus ejes de referencia. Este sistema permitirá obtener información importante para la evaluación y análisis espacial dentro del contexto del proyecto, asegurando una medición precisa y confiable del posicionamiento y la distancia.

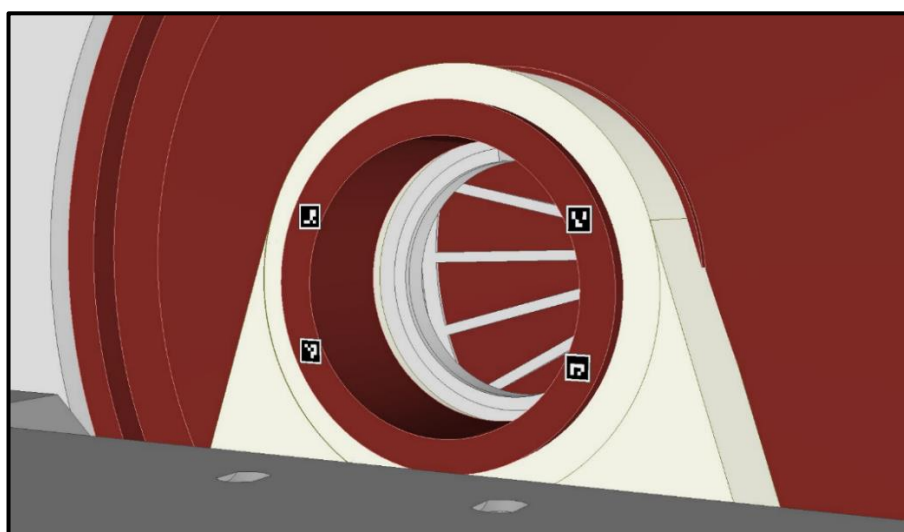
Con el fin de obtener una referencia más precisa y con instalación accesible en la zona de trabajo, la investigación propone colocar cuatro marcas Aruco en la región exterior de la entrada del molino. Esta estrategia tiene como finalidad principal

realizar una identificación preliminar efectiva de la zona central del molino. Reconocer esta área central es un aspecto clave, ya que se busca asegurar que el dron pueda ingresar de manera alineada con el eje axial del molino, lo cual facilita un acceso libre de colisiones y promovería una recopilación de datos más eficiente por parte del escáner 3D. Implementar esta táctica permite mejorar las condiciones de navegación del dron y para incrementar la exactitud de la información recolectada durante el proceso de inspección.

Las marcas se colocan de manera simétrica sobre la estructura del trunnion de alimentación, cada marca está situada de manera angular y dimensionalmente simétrica con respecto a la otra en el eje X del plano en la entrada del molino. A partir de la estratégica colocación de marcas Aruco en la entrada del molino como se muestra en la Figura 32; se utilizará la funcionalidad de la cámara incorporada en el dron para llevar a cabo mediciones de posición referencial. Las dimensiones de la posición de cada marca se encuentran detalladas en el plano del Anexo 2.

Figura 32

Posición de marcas Aruco



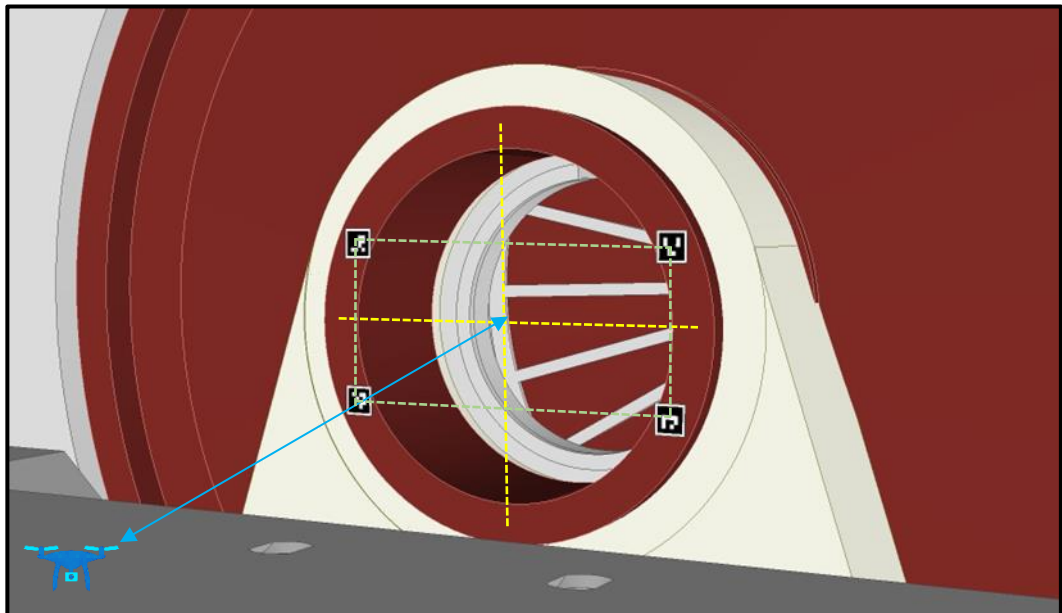
Nota: fuente Elaboración propia

Mediante el uso del algoritmo de visión artificial, se calculará la distancia existente entre el dron y cada una de las marcas Aruco.

Una vez recabadas estas mediciones, se procederá a contrastarlas entre ellas mismas y con las dimensiones geométricas establecidas en el diseño previamente realizado. Este paso de comparación y análisis es esencial para identificar las desviaciones en las distancias y ángulos entre lo calculado por el modelo de visión artificial y lo calculado con el modelo de ingeniería, graficado en la Figura 33. Al contar con posiciones referenciales precisas, se facilita significativamente el diseño y la implementación de la trayectoria de vuelo del dron, considerando sus distintos grados de libertad.

Figura 33

Distancias de ingeniería entre marcas Aruco y posición inicial



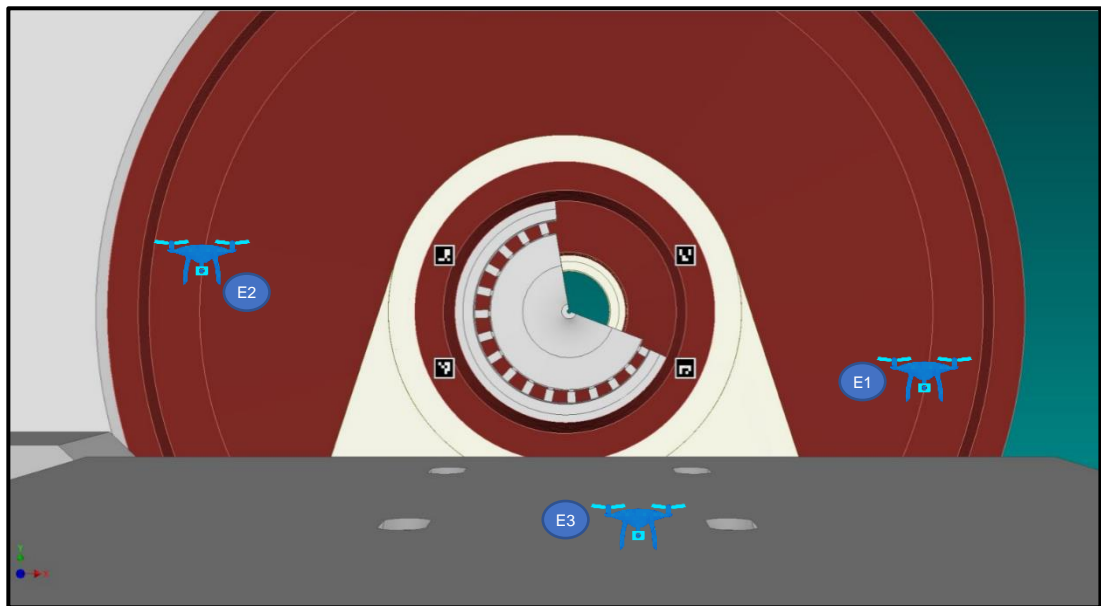
Nota: fuente Elaboración propia

Para el presente caso de investigación se plantean 3 escenarios para el análisis del algoritmo de visión artificial, siendo la primera con el dron situado a nivel del suelo y extremo derecho, el segundo caso al nivel del suelo extremo izquierdo

más cercano al ingreso y el tercer caso a un nivel sobre el suelo en la zona central del molino. Los 3 escenarios para analizar se aprecian en la Figura 34 y sus posiciones son detalladas en la sección posterior de análisis por visión artificial.

Figura 34

Posición inicial de los 3 escenarios de análisis



Nota: fuente Elaboración propia

5.3 Cálculo de trayectoria de dron

Conforme se detalló en secciones previas, el dron está capacitado con tres grados de libertad, los cuales son esenciales para guiar su movimiento desde una ubicación inicial, punto A, hasta un destino final, punto B. En la Figura 35, se exhiben de manera clara estos grados de libertad, representados a través de los ángulos de roll (ϕ), pitch (θ) y yaw (ψ), los cuales están asignados a los ejes coordenados (x, y, z) de manera respectiva.

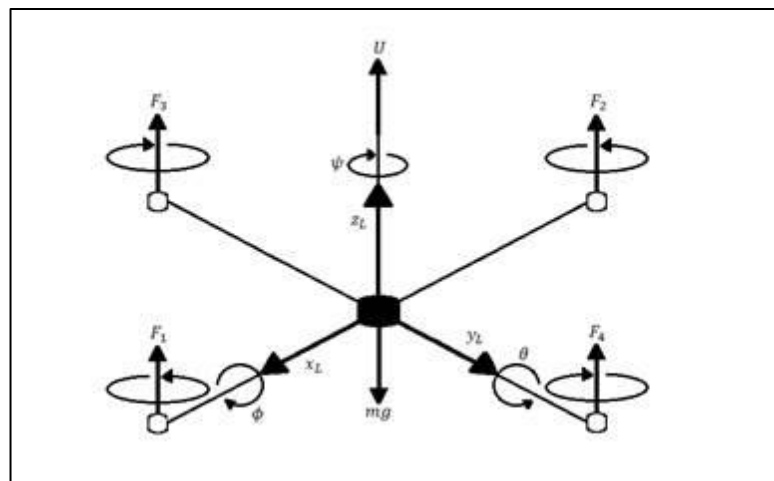
Estos tres grados de libertad son cruciales para el control preciso y la maniobrabilidad del dron en el espacio tridimensional, proporcionando la flexibilidad necesaria para realizar ajustes finos en su trayectoria y orientación. El ángulo de roll

(ϕ), asociado al eje x, permite que el dron realice giros sobre este eje, mientras que el ángulo de pitch (θ), vinculado al eje y, habilita el movimiento ascendente o descendente del dispositivo. Por último, el ángulo de yaw (ψ), relacionado con el eje z, otorga al dron la capacidad de rotar sobre sí mismo, ajustando su orientación horizontal.

La correcta manipulación y comprensión de estos grados de libertad son fundamentales para asegurar una navegación precisa y segura del dron, especialmente en entornos confinados o de difícil acceso, como es el caso de la inspección interna de un molino SAG. Al tener un dominio completo sobre estos parámetros, se puede planificar y ejecutar trayectorias de vuelo optimizadas, garantizando así la recolección efectiva de datos y minimizando los riesgos asociados a la operación del dron en dichas condiciones.

Figura 35

Grados de libertad de dron



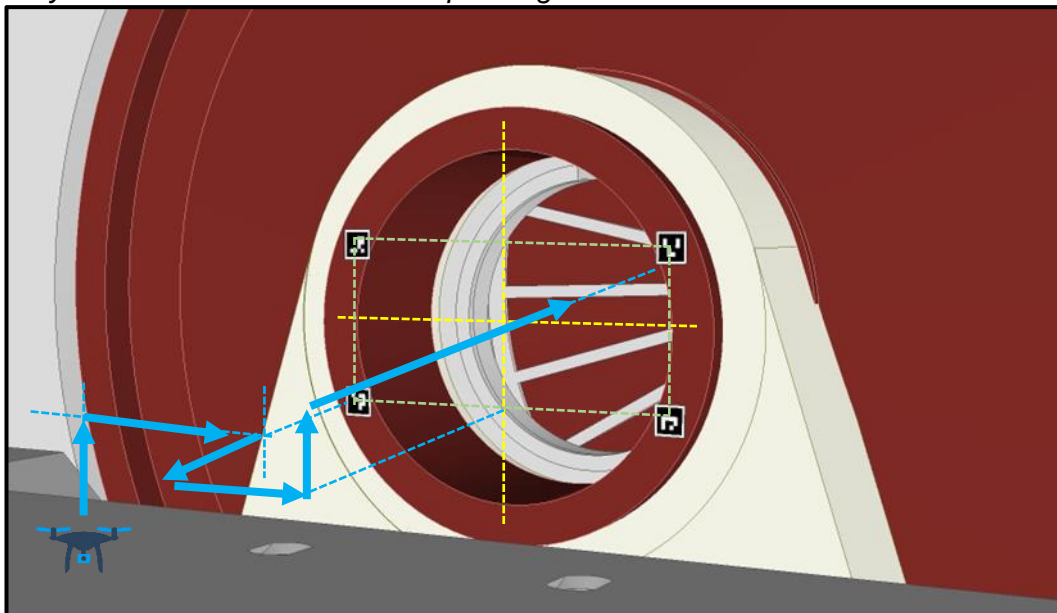
Nota: fuente “Diseño e implementación de un sistema de control de vuelo para un vehículo aéreo no tripulado tipo cuadricóptero” (Lara Sosa, Fagua Perez, Mauricio Salamanca, & Higuera Martínez, 2017)

El procesamiento del algoritmo de visión artificial permitirá conocer la distancia entre la posición inicial y el centro del ingreso al molino, siendo necesario el cálculo de la trayectoria de este recorrido representado en distancias y posición referencial que debe realizar cada grado de libertad del dron para alcanzar la posición final deseada. El algoritmo de navegación autónoma para un dron, diseñado para su posicionamiento en el centro de un molino a través de su tapa de alimentación, se desarrolla en cuatro etapas de trayectorias claramente definidas.

En la Figura 36 se muestran las trayectorias que debe recorrer el dron para ingresar al molino sin colisiones desde que parte de la posición inicial desde donde son visibles las 4 marcas Aruco para su referencia. Se considera como sistema de referencia el centro de la boca del molino.

Figura 36

Trayectorias de recorrido de dron para ingreso a molino



Nota: fuente Elaboración propia

El dron comienza su recorrido estando posicionado a nivel del suelo, por lo cual identificará primero a las marcas instaladas en la zona inferior del ingreso al molino. En el primer movimiento, el dron se eleva una altura conocida para identificar

la marca Aruco más cercana a su posición calculando la distancia euclidiana entre el centro de la cámara IP y el centro de la marca Aruco. Esta identificación es fundamental, ya que la marca Aruco sirve como punto de referencia esencial para la orientación y posicionamiento del dron. Una vez identificada esta marca, el dron procede a realizar el segundo movimiento alineándose de manera coplanar y concéntrica al eje XY de la misma, asegurando así una precisión en su posicionamiento que será crucial para los movimientos siguientes.

El tercer movimiento implica un desplazamiento en el eje Z (eje axial del molino) hasta alcanzar una distancia entre el dron y la marca más cercana que permita a la cámara la visión de las 4 marcas Aruco. El cuarto movimiento se realiza de manera horizontal en el eje X para el dron. En función del número ID de la marca Aruco detectada, el dron se mueve hacia la derecha o izquierda. La distancia de este desplazamiento se calcula de tal manera que, en el eje X, el dron se posicione simétricamente entre las dos marcas Arucos que estén a su altura. Esta maniobra es clave para asegurar que el dron se centre correctamente en relación con las marcas horizontales dentro del molino.

En el quinto movimiento, el enfoque se traslada al alineamiento vertical del dron. El dron asciende, ajustando su altura de manera precisa hasta que las distancias en el eje Y entre las dos marcas superiores y dos inferiores sean simétricas. Este ajuste vertical es vital para posicionar el dron en el centro vertical del espacio del molino, garantizando así una cobertura uniforme durante el escaneo y alcanzando a ubicarse en el eje axial del molino.

La sexta y última etapa de la trayectoria del dron involucra su ingreso al molino. En este punto, el dron está ubicado perpendicularmente respecto al eje del molino y avanza una distancia preestablecida hacia el interior. Este movimiento final es crucial, ya que permite al dron realizar un escaneo efectivo del interior del molino,

completando así su tarea de inspección autónoma en este entorno estructurado y restringido.

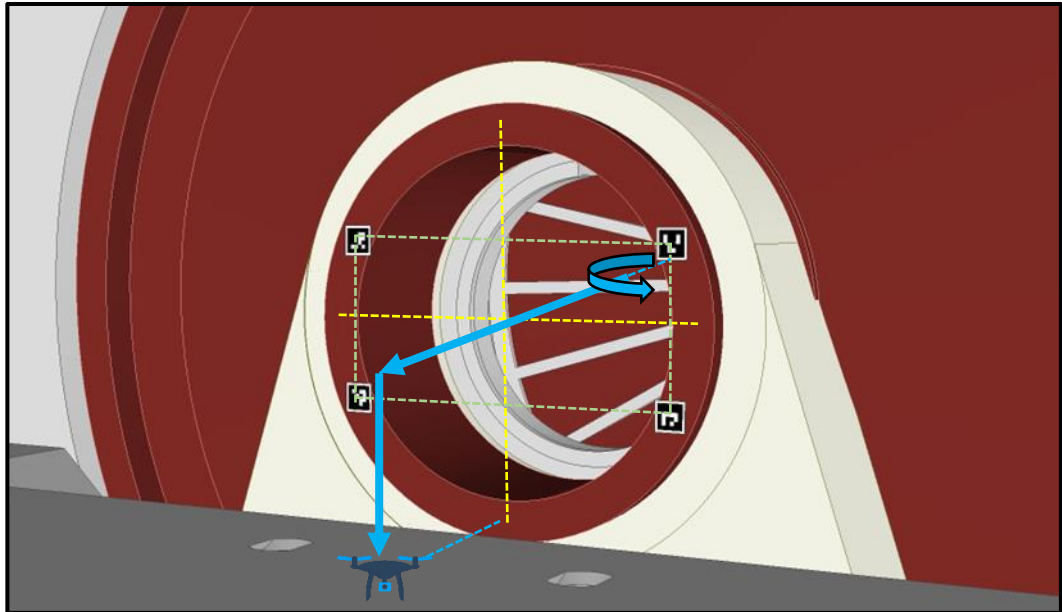
Dado que el escáner 3D hace un barrido del ambiente alrededor con sus láseres para medir el tiempo de rebote y calcular las distancias recorridas, el dron no requiere alta precisión en el eje axial para su posición dentro del molino. Obteniendo como resultado el levantamiento 3D en nube de puntos del estado actual de los revestimientos internos del molino.

Como se observa en la Figura 37, el procedimiento de retirada del dron, tras completar su tarea de inspección en el molino, se lleva a cabo en tres movimientos bien definidos, asegurando una salida segura y eficiente. El primer movimiento involucra un giro de 180° en Yaw para posicionar al dron apuntando al exterior del molino. El segundo movimiento implica la salida del dron del molino. Durante esta trayectoria, el dron se mantiene alineado con el eje axial del molino, manteniendo esta orientación mientras se retira una distancia preestablecida. Esta maniobra garantiza que el dron abandone el molino en una trayectoria directa y alineada, minimizando el riesgo de colisiones con las estructuras internas del molino y facilitando una navegación fluida hacia el exterior.

Una vez que el dron ha salido del molino, comienza el tercer movimiento para su retirada. En esta fase, el dron inicia un descenso controlado, bajando una distancia conocida que corresponde a la altura entre el eje axial del molino y el nivel de la superficie desde donde inicialmente partió. La combinación de estas dos trayectorias de retirada facilita la operación eficiente del dron y contribuye a la seguridad del dispositivo, al evitar obstáculos y garantizar un aterrizaje suave y controlado en su punto de origen

Figura 37

Trayectorias de retirada



Nota: fuente Elaboración propia

5.4 Desarrollo de algoritmo de visión artificial

El desarrollo del algoritmo de visión artificial para identificar el ingreso de un dron a un molino SAG de gran minería está basado en la identificación de marcas Aruco posicionadas en el exterior del trunnión de alimentación del molino.

a. Desarrollo de algoritmo de marca Aruco individual

En esta sección se describe el primer paso que consiste en desarrollar el algoritmo para identificar una marca Aruco en un ambiente de prueba física real. Se utilizó la librería OpenCV en lenguaje Python dada su flexibilidad para desarrollos de visión artificial con librerías que incluyen códigos para su amplia aplicación en distintos casos.

El objetivo es comparar los parámetros de la distancia y de posición referencial que existe entre la marca aruco y el punto de visión, donde el primer

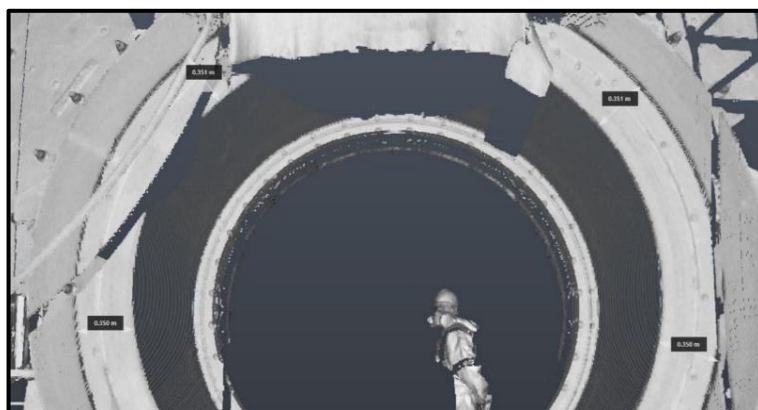
escenario serán los parámetros medidos en un entorno real y el otro escenario serán los resultados que se obtengan por la visión artificial.

Para el primer escenario, se experimenta en un entorno real con plantillas que representarán la marca Aruco y la posición de la cámara para la identificación visual. Se plantean 3 posiciones distintas de la cámara para validar el error que se presente entre los parámetros medibles de ingeniería (distancia y posición referencial) con los resultados del código de visión artificial. Asimismo, se considera la evaluación de 3 tipos de marcas Aruco de las librerías 4x4, 5x5 y 6x6, para identificar los resultados de identificación de posición en grandes distancias.

En el contexto de la investigación en curso, se encuentra un escenario de evaluación que impone restricciones específicas en cuanto al tamaño máximo disponible para la instalación de una marca Aruco. Este espacio disponible se limita a un margen de 350 mm en cada uno de sus lados, valor promedio como se ilustra en la Figura 38. Esta limitación se deriva de un levantamiento detallado realizado en la zona exterior de un molino SAG utilizando un escáner 3D, y se ha calculado teniendo en cuenta el valor promedio de las dimensiones medidas en el proceso de evaluación.

Figura 38

Ancho de estructura de ingreso al molino SAG



Nota: fuente Elaboración propia

Por tanto, para mantener un margen de instalación se selecciona un tamaño de marca Aruco de 300 mm por lado para captura de imágenes.

Para identificar la distancia máxima para realizar las pruebas, la relación entre el tamaño real de la marca Aruco y la distancia desde donde se toma su captura tienen una relación de proporcionalidad calculado en base a pruebas de distintos escenarios como se muestra en la tabla 10, donde se valida que el error de medida es tolerable en marcas de tamaño mínimo hasta de 1000 píxeles al cuadrado.

Tabla 10

Distancia máxima de detección de marcas por tamaño y resolución

Tamaño de marca Aruco (cm)	Resolución de cámara	Distancia (m)
10	640x360	1.155
10	1280x720	2.31
10	1920x1080	3.465
15	640x360	1.7325
15	1280x720	3.465
15	1920x1080	5.1975
20	640x360	2.31
20	1280x720	4.62
20	1920x1080	6.93

Nota: fuente “Módulos software para la navegación autónoma de un sistema de un sistema de asistencia a la movilidad basado entorno ROS” (Mir Carnicero, 2020)

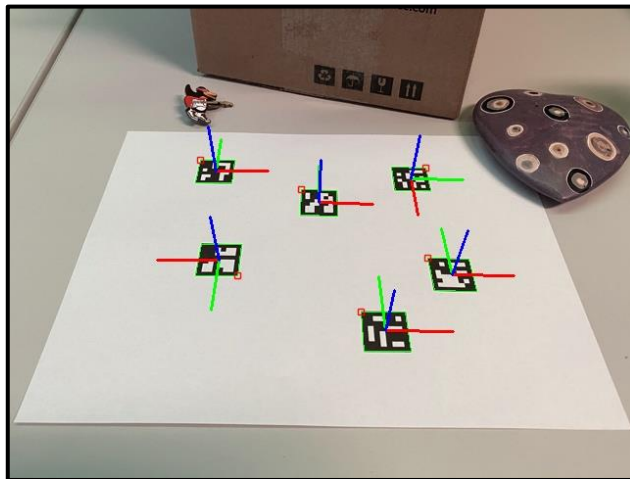
Para llevar a cabo las pruebas en un entorno que simule pruebas de identificación de imágenes reales, pero con limitaciones de espacio, se optó por utilizar espacios que son la mitad del tamaño de un entorno real. Esto significa que las marcas Aruco de prueba tendrán un tamaño de lado de 150 mm y, en base a la tabla previa, se establece un límite máximo de distancia 5.1975 metros haciendo uso de una cámara de resolución 1920x1080. Esta adaptación permite realizar ensayos efectivos en un entorno más controlado y manejable, manteniendo la

proporcionalidad y relevancia de los resultados para su aplicación en escenarios de tamaño real.

El sistema de referencia inicial es posicionado en el centro de la marca Aruco, de tal manera que el plano XY contendrá a la marca Aruco y el eje Z será perpendicular a estas, ver Figura 39.

Figura 39

Sistema de referencia en marca Aruco



Nota: fuente “Aruco Marker Detection” (OpenCV, 2023)

Una vez ubicado el sistema de referencia sobre la marca Aruco, se proponen 3 escenarios para el posicionamiento de la cámara. Los parámetros para medir consideran la distancia “d” y el ángulo relativo entre el centro de la marca y la posición central de la cámara “T”. La posición de la cámara se encontrará a la misma altura de las marcas, el cual está sobre 1500 mm. del nivel del suelo. Las posiciones se detallan en la Tabla 11 y se realiza la captura de datos en un entorno real mostrado en la Figura 40.

Tabla 11

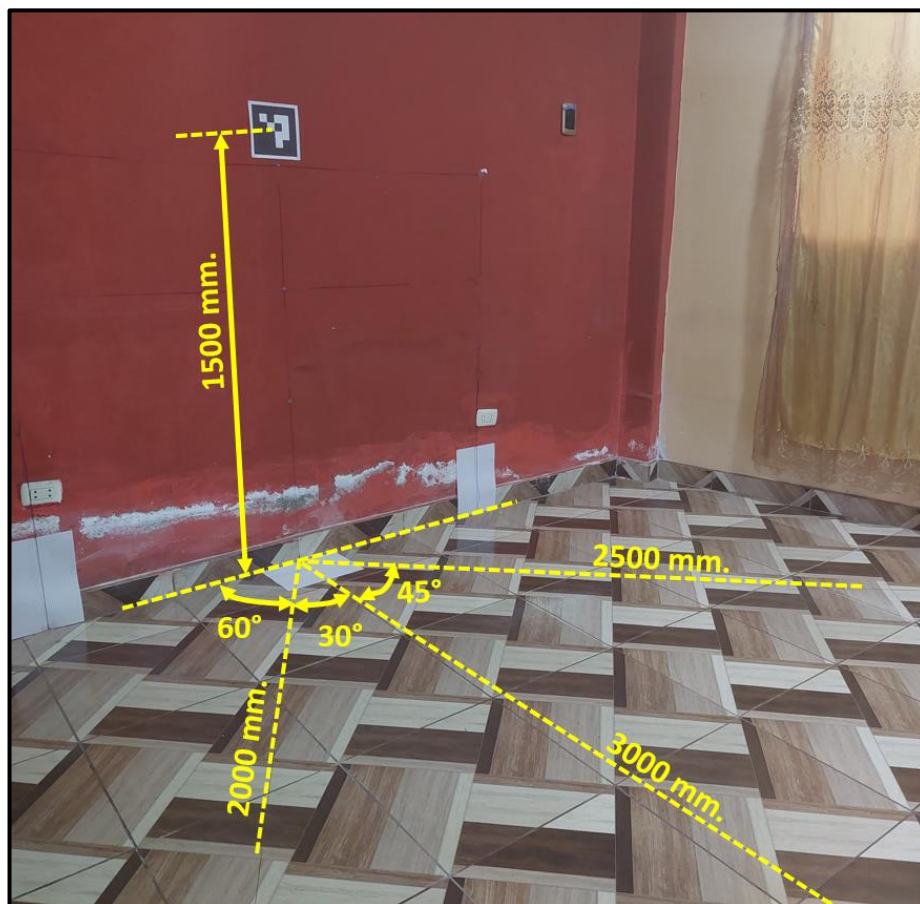
Posicionamiento de cámara para captura de datos

	Distancia "d" (mm.)	Ángulo de alineamiento "T" (°)
Posición 1	2000.0	-30.0
Posición 2	3000.0	0.0
Posición 3	2500.0	+45.0

Nota: fuente Elaboración propia

Figura 40

Entorno real de prueba para 3 posiciones de la cámara

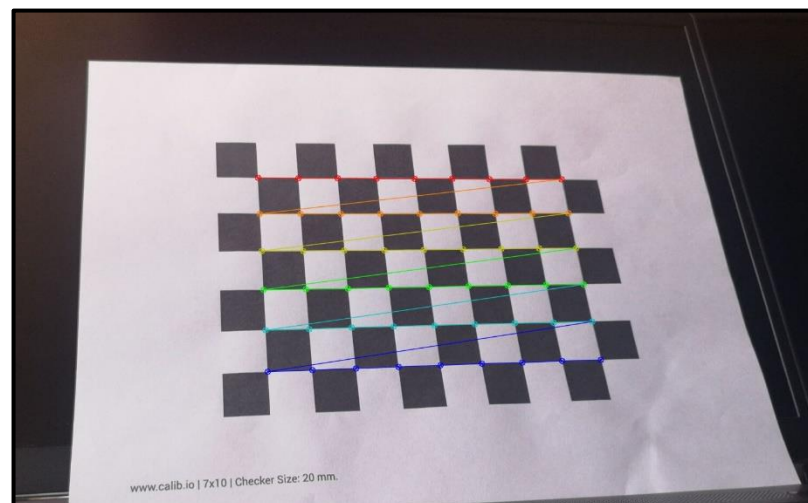


Nota: fuente Elaboración propia

Antes de iniciar la identificación de las marcas Aruco, se llevó a cabo la calibración de la cámara IP, que tiene una resolución de 1920x1080 seleccionada previamente para este estudio. Esta calibración se realizó mediante un código en Python y la utilización de un chessboard de 7x10 con cuadros de 20 mm, capturando 60 fotografías para el proceso de identificación de posicionamiento. Como resultado de esta calibración, se obtuvieron los parámetros intrínsecos y la distorsión de la cámara para asegurar la precisión y fiabilidad en la medición de distancias con la cámara.

Figura 41

Calibración de cámara 1920x1080 con chessboard 7x10 (a) captura de imágenes
(b) resultados de parámetros



(a)

```
# CALIB P20 1920x1080  
intrinsic_camera = np.array(((1528.0000,0, 986.825),(0,1528.3251,537.2497),(0,0,1)))  
distortion = np.array((0.06075,-0.20835,0.001320,0.006883,0.383541))
```

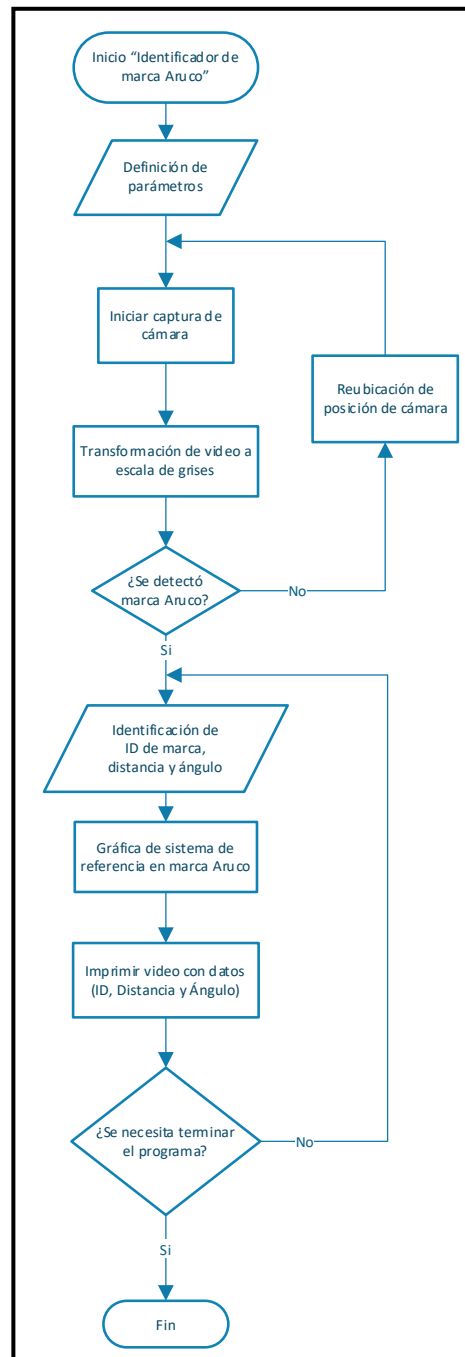
(b)

Nota: fuente Elaboración propia

La Figura 42 muestra el diagrama de flujo correspondiente al algoritmo desarrollado para la identificación de la marca Aruco y la medida de las distancias.

Figura 42

Diagrama de flujo de algoritmo para identificación de marca Aruco



Nota: fuente Elaboración propia

El diagrama de flujo desarrollado se basa en el código de programación en lenguaje Python, detallado en el Anexo 3. El algoritmo comienza importando las

librerías de OpenCV para los análisis de visión artificial y de Numpy para los cálculos numéricos, luego se importan los parámetros y el identificador de la marca Aruco para así con el comando “VideoCapture” invocar la imagen a analizar. Este diagrama de flujo no contempla la calibración de la cámara para encontrar sus valores intrínsecos y de distorsión porque este proceso se realizó previamente para encontrar los parámetros de la cámara IP de 1920x1080 de resolución. En la siguiente etapa del código se realiza el análisis de visión artificial identificando la ubicación de la marca Aruco que aparece en la imagen importada, para luego identificar sus esquinas y dibujar las aristas del cuadrado de la marca. Estas aristas suman un perímetro que está valorizado en cantidad de píxeles, por lo que se puede calcular una relación de píxeles a milímetros realizando una escala a partir del perímetro por ingeniería de la marca Aruco.

Conocida esta escala se pueden realizar mediciones en valores de milímetros a partir de la visión artificial, las líneas de código siguientes ayudan con el cálculo y resultados de la distancia “d” y el ángulo “T” que son las referencias para el posicionamiento.

b. Desarrollo de algoritmo para identificación de ingreso a molino SAG

En las secciones anteriores, se detalló la resolución de la cámara para el análisis de imágenes, el proceso de calibración de la cámara y la elección del tipo de marcador Aruco más conveniente para la investigación actual. En esta sección, se explica cómo se lleva a cabo la implementación de la visión artificial para determinar la ubicación de las marcas Aruco en la zona del ingreso al molino, y se elaborarán las trayectorias que tanto el dron como su cámara deben seguir para lograr una entrada adecuada al interior del molino y su posterior retiro.

Con el objetivo de una correcta identificación de las marcas, se desarrolló la identificación mediante visión artificial en un entorno real de prueba donde, debido a

las limitantes de espacio disponible, se realizó un escalamiento de factor 0.5 a las dimensiones reales que se describen en el Anexo 2. Este escalamiento no afecta la tarea de identificación por visión artificial dado que contempla escalar el tamaño de las marcas, sus distancias de separación, las alturas relativas al suelo y la distancia a la que se captura la data.

Figura 43

Entorno real de prueba para identificación de marcas Aruco



Nota: fuente Elaboración propia

En base al entorno de prueba mostrado en la Figura 43, se realizan 2 escenarios de pruebas donde la cámara iniciará su recorrido posicionado acorde los datos de la Tabla 12.

Tabla 12

Posicionamiento de cámara para identificación de marcas Aruco

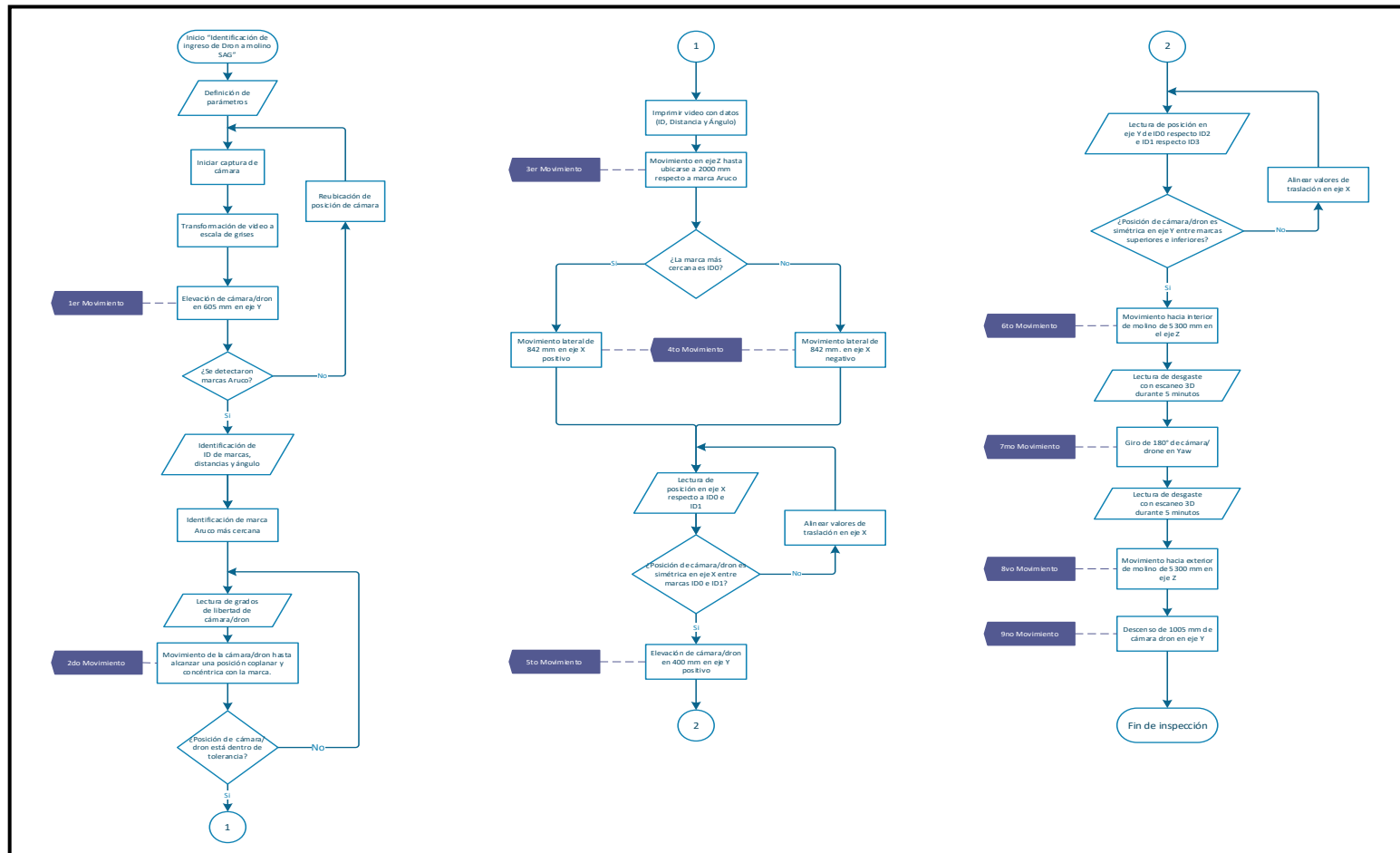
	Distancia "d" (mm.)	Ángulo de alineamiento "T" (°)	Altura sobre el nivel del suelo (mm.)
Posición 1	2000.0	-30.0	50.0
Posición 2	2500.0	+45.0	50.0

Nota: fuente Elaboración propia

En la Figura 44 se muestra el desarrollo del diagrama de flujo para la identificación de las marcas Aruco y su posición relativa respecto al centro de la cámara. En este diagrama de flujo se establecen los parámetros y acciones que se deben tomar en base a la identificación de la posición de la cámara respecto a las marcas Aruco para posteriormente realizar una trayectoria establecida. La identificación de las marcas y su posición relativa basado en tecnología de la visión artificial está desarrollada en base al código en lenguaje Python desarrollado en el Anexo 4.

Figura 44

Diagrama de flujo de algoritmo para identificación de ingreso de dron a molino SAG



Nota: fuente Elaboración propia

El diagrama de flujo comienza definiendo los parámetros que son necesarios para la identificación de marcas Aruco en un código de lenguaje Python, se importan las librerías de OpenCV para el análisis de visión artificial y la librería Numpy para los cálculos numéricos, también se definen los parámetros de las marcas Aruco a identificar, la captura de video en línea con cámara IP y los parámetros de calibración intrínsecos de la cámara y los coeficientes de distorsión, esenciales para la precisión en la estimación de la pose de los marcadores. Se establece una función para convertir matrices de rotación en ángulos de Euler (pitch, yaw, roll), permitiendo interpretar la orientación de los marcadores en términos más comprensibles.

En el bucle principal, el programa lee cada cuadro del video, lo convierte a escala de grises y detecta marcadores Aruco. Para cada marcador detectado, estima su pose -rotación y traslación- respecto a la cámara. Identifica el marcador más cercano basándose en la distancia euclidiana y calcula sus ángulos de Euler y traslación, mostrando esta información en la pantalla. Esta información tiene importante relevancia dado que influye directamente en la toma de decisiones de trayectorias, para el 1er movimiento se establece una elevación de la cámara de 605 mm, de esta manera la cámara debe identificar al menos una marca Aruco para calcular su distancia, caso contrario se debe posicionar el dron en otra posición.

Luego, la cámara implementará el código de visión artificial para detectar el ID de la marca detectada, su distancia euclidiana y los ángulos de Euler relativos, así podemos identificar la marca Aruco más cercana comparando las distancias. Con esta información se procede al 2do movimiento, el cual consiste en ubicar a la cámara de manera coplanar, paralela y concéntrica al plano de la marca Aruco más cercana, este movimiento se debe realizar hasta en los 6 grados de libertad de movimiento de ser necesario. Para el 3er movimiento, se considera que la cámara debe detectar visualmente las 4 marcas Aruco, por tanto, esta debe retroceder o avanzar hasta

tener una distancia de 2000 mm respecto la marca aruco más cercana en el eje Z de la cámara y mantenerse coplanar y concéntrica. El 4to movimiento consiste en posicionar a la cámara en el centro de las marcas Aruco en el eje X; dado que las marcas Aruco han sido instaladas en un orden conocido, la cámara tomará un movimiento lateral de 842 mm en el eje X positivo o negativo dependiendo del ID de la marca más cercana a la que se encuentre, este movimiento será complementado con la condición que las distancias en el eje X respecto a las marcas aruco ID 0 y 1 sean simétricas y opuestas dentro del rango de tolerancias previamente establecidos. Alcanzado este objetivo, el 5to movimiento consiste en una elevación de 400 mm en el eje Y positivo, de tal manera que la cámara se encontrará situada en el centro de las 4 marcas Aruco. En esta posición se debe establecer la precisión en el eje Y, esto se alcanza con el movimiento vertical de la cámara hasta que las distancias en el eje Y entre las marcas Aruco superiores (con ID 2 y 3) y las marcas inferiores (con ID 0 y 1) sean simétricas y opuestas hasta los valores de tolerancia aceptables. Con estos movimientos establecidos, se puede afianzar que la cámara (y el dron que la sostiene) se encuentra de manera concéntrica con el centro de las marcas Aruco, lo cual significa que también su posición es concéntrica al ingreso del molino habilitando así su ingreso de forma segura y sin colisiones. Con esta habilitación, el dron procede a su 6to movimiento que establece un movimiento en su eje Z positivo de 5300 mm posicionándose en la zona interna y central del molino, el valor de esta trayectoria se establece por las dimensiones ya conocidas al interior y exterior del molino SAG. Se considera que, durante toda la trayectoria del dron, el sensor Lidar está operando y escaneando su entorno generando así la nube de puntos para el procesamiento y análisis de desgaste de los revestimientos internos. Previo al siguiente movimiento, se considera mantener la posición durante 5 minutos para una mayor captura de datos y generación de mejor calidad de estos. Luego para obtener el mayor registro,

el 7mo movimiento consiste en una rotación en el eje vertical (yaw) de 180° que permitirá más mayor volumen de lectura al sensor Lidar, de igual manera se recomienda mantener la posición durante 5 minutos para optimizar la captura de datos.

Completados estos pasos se procede al retiro del dron del interior del molino, el 8vo movimiento consiste en un movimiento de 5300 mm en el eje Z positivo y posteriormente el 9no y último movimiento que consiste en el descenso de 1005 mm del dron hasta alcanzar la base inicial del suelo. De esta manera se completa el ciclo para inspección de dron al interior del molino SAG, escaneo de sus revestimientos, basado en posicionamientos con tecnología de visión artificial.

En base a lo descrito, la Tabla 13 muestra la trayectoria del dron en funciones paramétricas basadas en cada movimiento a realizar. El algoritmo brinda los datos de las distancias necesarias para realizar cada movimiento, por tanto, los tiempos necesarios son divididos por la velocidad mecánica del dron a implementar. Se considera como origen de coordenadas al punto zona central promedio entre las 4 marcas aruco, donde los ejes X e Y son coplanares al plano de las marcas aruco y el eje Z está posicionado en el eje axial del molino con dirección hacia su interior.

Posición inicial:

$$x = x_0$$

$$y = y_0$$

$$z = z_0$$

$$\theta = \theta_0$$

$$\phi = \phi_0$$

$$\psi = \psi_0$$

Tabla 13

Funciones paramétricas de trayectoria de dron

<p>1er movimiento</p> $x_1(t) = x_0$ $y_1(t) = y_0 + V_y * t_1 = y_0 + 600$ $z_1(t) = z_0$ $\theta_1(t) = \theta_0$ $\phi_1(t) = \phi_0$ $\psi_1(t) = \psi_0$	<p>2do movimiento</p> $x_2(t) = x_1(t) + V_x * t_2 = 842$ $y_2(t) = y_1(t) + V_y * t_2 = -400$ $z_2(t) = z_1(t) + V_z * t_2$ $\theta_2(t) = \theta_1(t) + W_\theta * t_2 = 0$ $\phi_2(t) = \phi_1(t) + W_\phi * t_2 = 0$ $\psi_2(t) = \psi_1(t) + W_\psi * t_2 = 0$	<p>3er movimiento</p> $x_3(t) = 842$ $y_3(t) = -400$ $z_3(t) = z_2(t) + V_z * t_3 = -2000$ $\theta_3(t) = 0$ $\phi_3(t) = 0$ $\psi_3(t) = 0$
<p>4to movimiento</p> $x_4(t) = 842 + V_x * t_4 = 0$ $y_4(t) = -400$ $z_4(t) = -2000$ $\theta_4(t) = 0$ $\phi_4(t) = 0$ $\psi_4(t) = 0$	<p>5to movimiento</p> $x_5(t) = 0$ $y_5(t) = -400 + V_y * t_5 = 0$ $z_5(t) = -2000$ $\theta_5(t) = 0$ $\phi_5(t) = 0$ $\psi_5(t) = 0$	<p>6to movimiento</p> $x_6(t) = 0$ $y_6(t) = 0$ $z_6(t) = -2000 + V_z * t_6 = 3300$ $\theta_6(t) = 0$ $\phi_6(t) = 0$ $\psi_6(t) = 0$
<p>7mo movimiento</p> $x_7(t) = 0$ $y_7(t) = 0$ $z_7(t) = 3300$ $\theta_7(t) = 0$ $\phi_7(t) = 0$ $\psi_7(t) = 0 + W_\psi * t_7 = -180$	<p>8vo movimiento</p> $x_8(t) = 0$ $y_8(t) = 0$ $z_8(t) = 3300 + V_z * t_8 = -2000$ $\theta_8(t) = 0$ $\phi_8(t) = 0$ $\psi_8(t) = 0 + W_\psi * t_7 = -180$	<p>9no movimiento</p> $x_9(t) = 0$ $y_9(t) = 0 + V_y * t_9 = -1005$ $z_9(t) = -2000$ $\theta_9(t) = 0$ $\phi_9(t) = 0$ $\psi_9(t) = 0 + W_\psi * t_7 = -180$

Nota: fuente Elaboración propia

Donde:

- x_0, y_0, z_0 son las coordenadas iniciales del dron en el eje X, Y y Z, respectivamente.
- θ_0, ϕ_0, ψ_0 son los ángulos de Euler iniciales del dron (roll, pitch, yaw).
- $V_x, V_y, V_z, W_\theta, W_\phi, W_\psi$ son velocidades del dron
- t es el tiempo en cada etapa calculado por el algoritmo y las velocidades

5.5 Criterios de selección de equipos

Esta sección se enfoca en la selección de tres componentes esenciales para la aplicación del algoritmo: el dron, la cámara y el escáner 3D. Cada elemento juega un papel importante para que el dron pueda ingresar, navegar y recopilar datos de manera eficiente dentro del entorno desafiante como lo es un molino SAG. La selección del dron se centra en encontrar un equilibrio entre estabilidad, autonomía y capacidad de carga para albergar los equipos adicionales. En cuanto a la cámara, se busca una que ofrezca claridad, precisión y compatibilidad con las condiciones de iluminación externas del molino. Por último, el escáner 3D debe ser capaz de generar mapeos detallados del interior del molino, facilitando así la navegación autónoma y la recopilación de datos. Esta sección detalla los criterios y consideraciones para elegir estos componentes, asegurando su adecuación para la tarea específica de inspección autónoma en molinos SAG.

Para seleccionar un dron que desarrolle operaciones en un ambiente minero, especialmente para el análisis de desgaste de revestimientos, se deben considerar características específicas que garanticen su eficiencia y seguridad. Primero, es fundamental que el dron posea especificaciones técnicas de protección IP, asegurando su capacidad para operar en condiciones mineras adversas. Además,

debe contar con una estructura externa robusta que lo proteja de colisiones, crucial en entornos con espacios restringidos y obstáculos considerando que sus dimensiones deben ser inferiores al tamaño de ingreso por la zona de alimentación del molino, el cual considera un radio de 1.700 m. mostrado en el Anexo 2.

La duración del vuelo es otro aspecto crítico; se requiere que el dron tenga una autonomía de vuelo de más de 10 minutos para realizar inspecciones efectivas sin interrupciones frecuentes para recargar y realizar el vuelo de ingreso y salida del molino. Respecto a la capacidad de adaptación, es esencial que el dron sea compatible con una cámara de alta resolución, igual o superior a una resolución de 1920x1080 píxeles, para capturar imágenes detalladas de las marcas Aruco. Además, debe poder integrar un sensor LiDAR con un margen de error máximo de 1 cm, ya que, en el análisis de desgaste, un margen de 10 mm es aceptable para mediciones del desempeño de los revestimientos. Estas especificaciones garantizan que el dron sea capaz de realizar inspecciones mineras con la precisión y eficacia requeridas.

En la tabla 14 se muestran las especificaciones técnicas de 3 drones comerciales para inspección de espacios confinados disponibles en el mercado (Alsayed, Yunusa-Kaltungo, K. Quinn, Arvin, & R.A.Nabaway, 2021), donde se evalúan cuales pueden cumplir con las consideraciones específicas para la investigación presente.

Tabla 14*Especificaciones técnicas de 3 drones comerciales*

Nombre	Tamaño total	Peso total	Sensores incluidos	Precisión de escáner 3D	Grado de protección	Nota: fuente
Elios 3	48x38 cm	2350 g. +/-15 g.	IMU, LIDAR, cámara, sensor de distancia	±0.8 – 4 cm	IP68	(Flyability, 2023)
Hovermap Emesent & DJI dron	887x880x378 mm	5.64 kg.	IMU, LIDAR, cámara, sensor de distancia	±1 – 3 cm	IP43	(Emesent, 2023) (Baylis, Kewe, & Jones, 2020)
5.1.3BLK 2FLY	53 x 60 x 19 cm	2.6 kg.	LIDAR, cámara, sensor de distancia	±2 – 4 cm	IP54	(Leica Geosystems, 2023)

Nota: fuente Elaboración propia

Capítulo VI. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se evalúa el rendimiento del algoritmo de visión artificial implementado en un dron con cámara, diseñado para ingresar a un molino SAG durante parada de planta y hacer un levantamiento de nube de puntos para realizar el análisis de desgaste de los revestimientos en un molino SAG y mejorar la seguridad del personal experto evitando su exposición a zonas de trabajo con alto riesgo. El análisis se centró en la eficacia del algoritmo para identificar las marcas Aruco y posicionarse de manera eficaz en el interior del molino. Se compararon los resultados de distancia medidos por visión artificial con las medidas en un entorno real de simulación, encontrando que el algoritmo de visión artificial mostraba una precisión y fiabilidad dentro de valores tolerables que permitirán el ingreso del dron al interior del molino SAG evitando colisiones durante su trayectoria.

Se evalúa también la notable mejora en la evaluación de seguridad del personal operativo. La implementación del dron minimizó la necesidad de ingreso humano al interior del molino el cual es considerado un espacio confinado con los riesgos que conllevan, lo que resultó en una disminución notable de incidentes y accidentes. Este cambio representa un avance significativo en las prácticas de seguridad en el entorno de minería.

6.1. Análisis de algoritmo de visión artificial

6.1.1 Pruebas de algoritmo de marca Aruco individual

En base al algoritmo para identificación de marca Aruco del capítulo anterior, se realizaron pruebas en el entorno de prueba real. Se aplica el código de programación utilizando las imágenes de las 3 posiciones planteadas en la Tabla 11, obteniendo los resultados en cada uno de los escenarios que se describen en la Tabla 15.

Tabla 15*Parámetros medidos por visión artificial*

Parámetros medidos por VA		Distancia "d" (mm.)	Ángulo de alineamiento "T" (°)
Aruco 4x4	Posición 1	2013.6	-30.22
	Posición 2	3027.2	2.00
	Posición 3	2516.4	45.13
Aruco 5x5	Posición 1	2070.2	-31.29
	Posición 2	3008.9	3.90
	Posición 3	2507.0	45.69
Aruco 6x6	Posición 1	2029.6	-31.31
	Posición 2	3008.4	4.69
	Posición 3	2496.0	46.56
Aruco 7x7	Posición 1	2056.3	-30.98
	Posición 2	3008.8	3.98
	Posición 3	2540.4	45.44

Nota: fuente Elaboración propia

Los resultados obtenidos por ambas metodologías (medición manual y por visión artificial) permiten calcular el error en valores que existe entre la medición por visión artificial respecto a la medida base por ingeniería. La Tabla 16 muestra los resultados del cálculo del margen de error que existe entre las metodologías.

Tabla 16*Margen de error por metodología*

Parámetros medidos por VA		Error "d" (mm.)	Error "T" (°)
Aruco 4x4	Posición 1	13.6	-0.22
	Posición 2	27.2	2.00
	Posición 3	16.4	-0.10
Aruco 5x5	Posición 1	70.2	-1.29
	Posición 2	8.9	3.90
	Posición 3	7.0	0.69
Aruco 6x6	Posición 1	29.6	-1.31
	Posición 2	8.4	4.69
	Posición 3	-4.0	1.56
Aruco 7x7	Posición 1	56.3	-0.98
	Posición 2	8.8	3.98
	Posición 3	40.4	0.44

Nota: fuente Elaboración propia

La elección de la marca Aruco más adecuada para este estudio involucró un análisis estadístico detallado de los errores correspondientes a cada una. Mediante el proceso de normalización estadística de estos errores y asignándoles un peso de igual ponderación a las variables de distancia "d" y ángulo "T", se obtuvieron los siguientes resultados:

- Aruco 4x4: Promedio total de error normalizado = 0.218
- Aruco 5x5: Promedio total de error normalizado = 0.413
- Aruco 6x6: Promedio total de error normalizado = 0.349
- Aruco 7x7: Promedio total de error normalizado = 0.442

Los resultados estadísticos muestran numéricamente que la marca Aruco 4x4 tiene menor valor de error normalizado respecto a las otras marcas, asimismo, sus resultados de medición por visión artificial están dentro del rango de ± 30 mm. y de $\pm 2^\circ$.

Estos valores serán referenciales para la siguiente sección donde se calculará el error total al medir más de una marca Aruco y que defina el posicionamiento del dron al ingresar por el trunnión del molino.

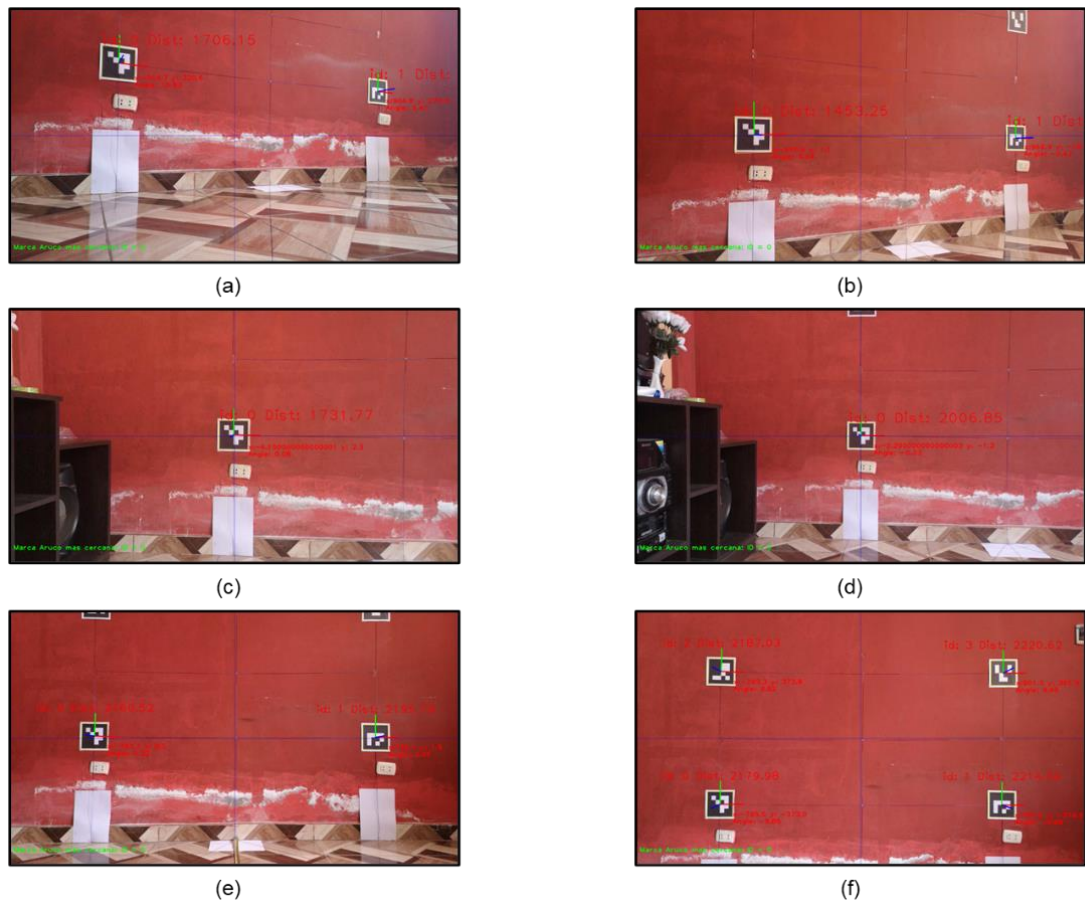
6.1.2 Pruebas de algoritmo para identificación de ingreso a molino SAG

En base al algoritmo y código en lenguaje Python desarrollados en el capítulo previo, se desarrollaron las pruebas en un entorno real considerando dos escenarios como punto de partida para la trayectoria desde este origen hasta el ingreso al interior del molino SAG como se describió en la Tabla 12.

Para el caso del escenario 1, la Figura 45 muestra las distintas posiciones de la cámara antes de su próximo movimiento. Los valores numéricos que representan la posición del centro de la cámara en relación con el centro de cada marca Aruco se consideran parámetros independientes.

Figura 45

Pruebas de posicionamiento en primer escenario (a) Punto Inicial (b) Movimiento #1 (c) Movimiento #2 (d) Movimiento #3 (e) Movimiento #4 (f) Movimiento #5



Nota: fuente Elaboración propia

Estos parámetros, junto con el margen de error y los valores de tolerancia configurados, determinan la factibilidad de llevar a cabo el siguiente movimiento. En este escenario, la cámara comenzó en una posición de 50mm sobre el nivel del suelo y -30° grados respecto al centro del molino SAG. Los valores numéricos de cada posición previamente al siguiente movimiento se encuentran detallados en la

Tabla 17. Esta tabla presenta los valores de X e Y que determinan la ubicación deseada de las marcas y también abarca hasta el 6to movimiento, el cual

	Aruco ID 0		Aruco ID 1		Aruco ID 2		Aruco ID 3	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1ra Posición	-514.7	320.6	-	-	-	-	-	-
2da Posición	-410.8	1.1	-	-	-	-	-	-
3ra Posición	-4.1	2.3	-	-	-	-	-	-
4ta Posición	-2.2	-1.2	-	-	-	-	-	-
5ta Posición	-797.7	8.5	796.1	1.9	-	-	-	-
6ta Posición	-795.5	-373.0	790.9	-379.9	-793.3	372.8	801.3	365.9

es el último donde dichos valores son relevantes para la toma de decisiones.

Tabla 17

Posicionamiento de cámara en Escenario 1

	Aruco ID 0		Aruco ID 1		Aruco ID 2		Aruco ID 3	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1ra Posición	-514.7	320.6	-	-	-	-	-	-
2da Posición	-410.8	1.1	-	-	-	-	-	-
3ra Posición	-4.1	2.3	-	-	-	-	-	-
4ta Posición	-2.2	-1.2	-	-	-	-	-	-
5ta Posición	-797.7	8.5	796.1	1.9	-	-	-	-
6ta Posición	-795.5	-373.0	790.9	-379.9	-793.3	372.8	801.3	365.9

Nota: fuente Elaboración propia

Para el escenario 2, la posición inicial está situado a 50 mm sobre el nivel del suelo y a 45° respecto al centro de las marcas Aruco. Los valores capturados en el entorno de prueba real se observan en la Figura 46 y se detallan en la Tabla 18.

Figura 46

Pruebas de posicionamiento en segundo escenario (a) Punto Inicial (b) Movimiento #1 (c) Movimiento #2 (d) Movimiento #3 (e) Movimiento #4 (f) Movimiento #5



Nota: fuente Elaboración propia

Tabla 18*Posicionamiento de cámara en Escenario 2*

	Aruco ID 0		Aruco ID 1		Aruco ID 2		Aruco ID 3	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1ra Posición	-408.5	295.5	651.3	296.1	-	-	-	-
2da Posición	-454.3	-10.7	626.3	-0.3	-449.9	753.4	-	-
3ra Posición	-1.5	0.0	-	-	-	-	-	-
4ta Posición	-0.4	-0.7	-	-	-	-	-	-
5ta Posición	-799.2	2.7	796.7	4.3	-	-	-	-
6ta Posición	-793.9	-372.2	798.4	-364.1	-798.3	374.9	798.8	382.6

Nota: fuente Elaboración propia

Como se especificó en la descripción de cada movimiento, los resultados de medición en cada posición deben cumplir estar dentro de un rango de tolerancias para poder proceder con el movimiento subsiguiente. En las pruebas de los escenarios 1 y 2, se desestiman los resultados de las primeras posiciones por ser puntos iniciales y de trayectoria. Por tanto, se miden los valores X e Y de la 6ta posición que corresponden a la posición final objetivo previo al ingreso del dron, siendo estos valores los más relevantes para el correcto ingreso del dron sin colisiones.

La tabla 6.5 muestra el recopilado en valor absolutos de las distancias en ejes X y Y por cada marca Aruco identificada en los dos escenarios para las posiciones finales previo ingreso a molino y las mediciones objetivo que fueron medicadas en el escenario real.

Tabla 19*Distancias a marcas Aruco en 6ta posición*

Pruebas	Marca Aruco	X	X objetivo	Y	Y objetivo
Escenario 1	Aruco ID 0	795.5	842	373.0	400
	Aruco ID 1	790.9	842	379.9	400
	Aruco ID 2	793.3	842	372.8	400
	Aruco ID 3	801.3	842	365.9	400
Escenario 2	Aruco ID 0	793.3	842	372.2	400
	Aruco ID 1	798.4	842	364.1	400
	Aruco ID 2	798.3	842	374.9	400
	Aruco ID 3	798.8	842	382.6	400

Nota: fuente Elaboración propia

En este trabajo de investigación, se aplicó una prueba t-student para evaluar la precisión en la medición de distancias en los ejes X y Y utilizando marcas Aruco en comparación con una medición mecánica en un entorno real de prueba. La hipótesis nula (H0) planteada fue que no hay diferencias significativas en la precisión de las mediciones entre los métodos de marcas Aruco y la medición mecánica. La hipótesis alternativa (H1) sostuvo que existen diferencias significativas en la precisión entre estos dos métodos.

Se eligió una prueba t de muestras independientes dado que cada conjunto de mediciones se realizó bajo condiciones distintas. Se fijó un nivel de significancia de 0.05. Al realizar la prueba t, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Para la variable X (mediciones con marcas Aruco vs. X objetivo):
- Estadística t: -36.64
- Valor p: aproximadamente 2.93×10^{-9}
- Para la variable Y (mediciones con marcas Aruco vs. Y objetivo):

- Estadística t: -12.14
- Valor p: aproximadamente 5.88×10^{-6}

Estos resultados sugieren que hay diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones realizadas con marcas Aruco y las mediciones objetivas tanto para X como para Y, dado que los valores p son extremadamente pequeños. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula que indica que no hay diferencias significativas entre las mediciones.

Para lograr la validación de la hipótesis nula, se propone actualizar los valores de X objetivo a 795 mm y Y objetivo a 375 mm. Con estos datos actualizados, los resultados de la prueba t y los valores p para las mediciones X y Y actualizados son los siguientes:

- Para la variable X (mediciones con marcas Aruco vs. X objetivo actualizado):
 - Estadística t: 0.98
 - Valor p: aproximadamente 0.36
- Para la variable Y (mediciones con marcas Aruco vs. Y objetivo actualizado):
 - Estadística t: -0.83
 - Valor p: aproximadamente 0.44

Estos resultados indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones realizadas con marcas Aruco y las mediciones objetivas tanto para X como para Y actualizados, ya que los valores p son mayores que el umbral convencional de significancia de 0.05. Por tanto, se valida la hipótesis nula que indica que no hay diferencias significativas entre las medidas mediante el método con visión artificial y las medidas mecánicas, permitiendo un diámetro disponible para el ingreso seguro del dron.

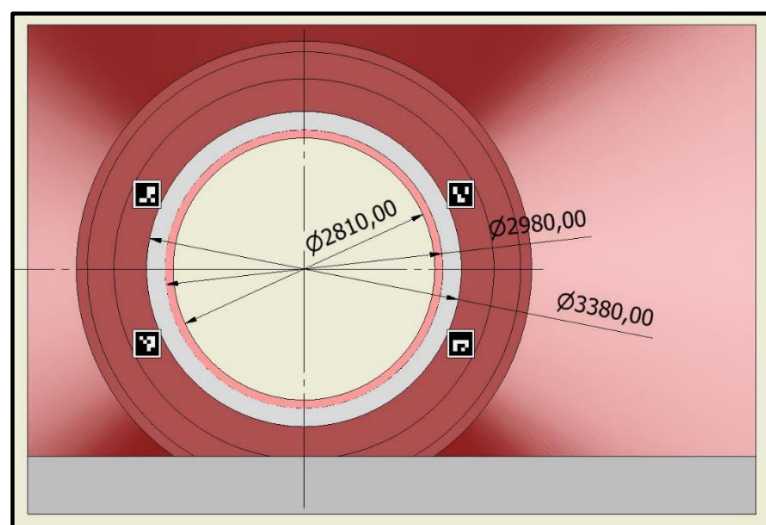
Estos valores objetivos actualizados reflejan un margen de seguridad considerado apropiado para el estudio elaborado, valores más bajos a los propuestos tienen mayores probabilidades de permitir el ingreso del dron sin colisiones.

En el contexto de la presente investigación, se recalculó el radio a partir de los valores X y Y objetivos actualizados, obteniendo un valor de 879 mm. Este resultado, al ser comparado con el radio original de 932 mm, representa una precisión del 94.3%. Este hallazgo sugiere que, aunque hay una desviación respecto al valor objetivo, la precisión alcanzada es considerablemente alta, lo cual es prometedor para la implementación de la visión artificial para el ingreso de drones en molinos SAG.

Se calcula un diámetro que considere el margen de seguridad por la precisión con este tipo de tecnología por donde podrá ingresar el molino, siendo este diámetro el 94.3% del diámetro interno de los revestimientos de la tapa, que es de 2980 mm. La Figura 47 muestra las dimensiones incluyendo el diámetro actualizado de 2810 mm, el cual es el máximo tamaño que puede medir el dron para ingresar al molino de forma segura.

Figura 47

Diámetro de ingreso a molino SAG



Nota: fuente Elaboración propia

6.1.3 Selección de equipos

Analizando a detalle las opciones que se describieron previamente y con el objetivo de cumplir con las características técnicas de tamaño, tipo de cámara y sensor de escáner 3D, se selecciona el modelo del dron Elios 3 como la opción para aplicar en el proyecto por tener menor tamaño, peso, precisión más certera y mayor grado de protección en ambientes agrestes.

El dron Elios 3 desarrollado por la compañía Flyability, es un dron comercial de control manual que ha sido probado de manera exitosa en ambientes agrestes e industriales como son los espacios mineros (Flyability, 2023). En cuanto a sus capacidades de vuelo, dispone de sensores de control de vuelo que incluyen IMU, magnetómetro, barómetro, LiDAR, 3 cámaras de visión computarizada y sensor de distancia ToF. El tiempo de vuelo del Elios 3 es de más de 12 minutos y 30 segundos, y con la carga del mapeo LiDAR, supera los 9 minutos. Además, está diseñado para resistir salpicaduras y polvo, con una protección equivalente a IP44.

El dron está construido con materiales como fibra de carbono, composites de Kevlar, aleación de magnesio, aluminio de grado aeronáutico y termoplásticos de alta calidad. Utiliza 4 motores eléctricos brushless de rápida inversión y opera en un rango de temperatura de 0 °C a 50 °C. Cuenta con un ordenador a bordo Nvidia Xavier NX y 4 hélices de 5 pulgadas.

El escáner 3D del Elios 3 utiliza un sensor LiDAR Ouster OS0-32 beams con un campo de visión vertical de 90° (+45° to -45°) y horizontal de 360° con una precisión mínima de +-0.8 cm. y máxima de +- 4.0 cm para un alcance de 35 m. Sin embargo, para el estudio actual se propone el uso del sensor LiDAR Ouster OSDome que tiene un campo de visión vertical de 180° y horizontal de 360° con precisión mínima de +-1.0 cm. y máxima de +- 10.0 cm con un alcance de 20m., el cual,

posicionado de manera horizontal podrá realizar un registro completo del interior del molino durante el recorrido de ingreso y salida.

La cámara integrada en el dron puede inclinarse 90 grados hacia abajo y 90 grados hacia arriba, con una cabeza de carga amortiguada para vibraciones. Tiene modos de control automático con compensación manual de EV, almacenamiento en tarjeta MicroSD de hasta 128 GB, y una distancia mínima de muestreo en el suelo de 0.18 mm/pix a 30 cm. La lente tiene una longitud focal fija de 2.71 mm, y la cámara es capaz de grabar video en 4k Ultra HD a 30 fps y tomar fotos con una resolución de 4000 x 3000. Estas características suplen la necesidad de una cámara de 1920x1080 píxeles de resolución para el análisis de las imágenes de la posición de las marcas Aruco.

Asimismo, las dimensiones geométricas del dron modelo Elios (480 mm de alto y 380 mm de ancho) cumplen con el diámetro recomendado para ingreso a molino SAG (2793 mm) incluso considerando una tolerancia de seguridad.

Estas características técnicas y físicas del dron Elios 3, su cámara y el escáner 3D permitirán realizar la inspección autónoma en entornos agrestes como los molinos SAG, asegurando una recopilación de datos precisa y eficiente. Por tanto, este dron es seleccionado como referencia para el trabajo de inspección de revestimientos de molinos.

Figura 48

Dron Elios 3



Nota: fuente Flyability Elios 3 (Flyability, 2023)

6.2. Análisis de seguridad en inspección con visión artificial

En el contexto de esta investigación, se efectuó un análisis de los riesgos asociados con el trabajo de inspección de revestimientos en molinos SAG, trabajo que se considera de alto riesgo por ser considerado trabajo en espacio confinado. También se detalló una revisión de incidentes de seguridad relacionados al trabajo al interior del molino.

El análisis de nivel de riesgo, fundamentado en la normativa peruana vigente indicado en el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Ed. 2020 aprobado por el D.S. N° 024-2016-EM modificado por D.S. N° 023-2017-EM, incluyó el desarrollo de una matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos y Controles (IPERC), para establecer una línea base del nivel de riesgo en el escenario actual donde el personal inspecciona directamente los revestimientos y el escenario propuesto donde una solución tecnológica, un dron equipado con sensores y actuadores, sustituye la exposición al peligro.

La evaluación del escenario actual reveló diversos riesgos, con nueve tareas clasificadas como de riesgo tolerable y cuatro como de riesgo moderado, según los criterios definidos en la normativa peruana. Esta evaluación se aprecia en la Tabla 7. Los riesgos identificados abarcan las actividades de preparación del molino para su ingreso, acceso al molino, inspección de revestimientos y acceso al exterior del molino. Las tareas específicas detectaron peligros como caídas de altura hasta la exposición a sustancias nocivas, pasando por el peligro de accidentes con maquinaria en movimiento y lesiones por esfuerzos repetitivos. Esta identificación de riesgos demostró las actuales condiciones de seguridad a las que están expuestos los trabajadores en las inspecciones manuales, destacando la necesidad de encontrar métodos alternativos más seguros.

En contraste, el escenario propuesto mostrado en la Tabla 8, que involucra el ingreso autónomo de un dron al molino para su inspección, mostró una mejora significativa en términos de seguridad. La matriz IPERC, ajustada al uso de dron y alineada con los estándares de seguridad peruana, indicó que diez de las tareas eran de riesgo tolerable y solo una era de riesgo moderado. La notable reducción en el nivel de riesgo se debió en gran medida a la minimización del ingreso humano en áreas de alto riesgo del molino. El dron redujo la exposición a riesgos físicos y, por ende, las posibilidades de accidentes relacionados con trabajo de alto riesgo en un ambiente de espacio confinado.

La propuesta presentó un nivel de riesgo considerablemente inferior en comparación con los peligros directos y físicos inherentes a las inspecciones manuales. Este cambio en la metodología de inspección significó un avance en la jerarquía de controles de riesgo. Mientras que el proceso actual se situaba en el ámbito del control administrativo y el uso de Equipos de Protección Personal (EPP), la implementación del dron estableció una mejora hacia la estrategia de control por

sustitución. Este avance es significativo dado que al reemplazar una actividad de alto riesgo (exposición de personal a espacio confinado) por otra de menor riesgo (implementación de dron para inspecciones), se prioriza dentro de la jerarquía de controles de seguridad por su mayor efectividad.

Por último, se contrasta la hipótesis general planteada en el acápite 3.1 del trabajo de suficiencia donde se menciona:

H1: Al optimizar un proceso de inspección de desgaste de revestimientos de molinos realizado por un vehículo aéreo no tripulado (empleando visión artificial) en molinos SAG de 40 ft., mejorará la seguridad de inspectores al reducir la exposición de su integridad a riesgos de trabajos en espacios confinados.

De acuerdo con los resultados obtenidos en materia de seguridad, mejora en jerarquía de seguridad migrando de estrategia de control por uso de EPP's hacia estrategia de control por sustitución, se valida el cumplimiento para las variables indicadas en el acápite 3.2. Por lo tanto, se valida que la hipótesis planteada es verdadera.

Conclusiones

Se concluye que se logra reducir los riesgos para los inspectores con el diseño de un algoritmo de visión artificial para referenciar la posición del vuelo de un dron en la inspección de revestimientos de molinos SAG en gran minería. La jerarquía de controles de riesgo para esta labor mejoró desde el ámbito de control administrativo hacia la estrategia de control por sustitución, evitando la exposición del personal a riesgos propios de la tarea.

Se concluye que el diseño del algoritmo de visión artificial con identificación de marcas Aruco permite analizar la zona de ingreso del molino y el correcto posicionamiento con una precisión del 94.3% para la evitación de colisiones durante el escaneo de los revestimientos de molinos.

Se concluye que el levantamiento de medidas con escáner 3D del exterior e interior del molino SAG 40' real en terreno permite generar un gemelo digital 3D para la evaluación de pruebas del algoritmo de visión artificial con un margen de error del 0.09% en medidas.

Se concluye que la integración exitosa de la tecnología de drones en las inspecciones de revestimientos de molinos SAG establece un nuevo estándar en las prácticas de inspección industrial. La combinación de drones con un algoritmo de visión artificial avanzado demuestra ser una herramienta valiosa no solo en términos de seguridad, sino también en eficiencia y precisión. Este avance tecnológico, al alinear la práctica de inspección con las normativas de seguridad más recomendadas, tiene el potencial de influir positivamente en la industria minera en el mercado nacional y mundial.

Se concluye que el diseño del algoritmo de visión artificial para un dron, para optimización del proceso de inspección de revestimientos y reducir riesgos de exposición a inspectores en molinos SAG de gran minería cumple con los indicadores propuestos en el acápite 3.2. Asimismo, se confirma la hipótesis general, planteada en el acápite 3.1, es positiva.

Recomendaciones

Se recomienda a las operaciones de gran minería, o empresas relacionadas, aplicar el diseño del algoritmo de visión artificial para el ingreso de dron a un molino SAG para optimizar en términos de seguridad, eficiencia y precisión la tarea de inspeccionar los revestimientos y el interior de los molinos.

Se recomienda continuar con la investigación e implementación del algoritmo de visión artificial en entornos mayor controlados y posterior aplicación en una unidad minera durante una parada de planta real. Con esto se podrá mejorar aún más su precisión y fiabilidad haciéndolo adaptable en diferentes condiciones ambientales y operativas.

Se recomienda para futuras investigaciones el diseño y producción local de un dron específicamente para la tarea de inspección de liners, con mejoras en aspectos como la carga a través de energía solar y una navegación completamente autónoma y programada. El objetivo de estas mejoras es mejorar la precisión, reducir los tiempos de traslado y optimizar los parámetros de sostenibilidad del dispositivo.

Se recomienda complementar el análisis de protocolos específicos de seguridad para las operaciones de drones en entornos industriales. Esto debería incluir la evaluación de riesgos, la planificación de rutas de vuelo seguras y la implementación de medidas de contingencia para situaciones de emergencia.

Referencias bibliográficas

- Aguilar Titi, E. (2017). *Optimización de molinos Semi-Autogenos*. Arequipa.
- Alsayed, A., Yunusa-Kaltungo, A., K. Quinn, M., Arvin, F., & R.A.Nabaway, M. (2021). *Drone-Assisted Confined Space Inspection and Stockpile Volume Estimation*. Remote Sensing.
- Barrera Cuadros, D., & Choque Uscamayta, A. (2020). *Implementación de un plan de mantenimiento de cambio de liners de un molino SAG mill 40 ft x 25 ft*. Arequipa, Perú.
- Barrera, D., Cerrillo, L., Gongora, F., Yance, A., & Orellana, N. (2021). Design of a wear estimator for liners in SAG Mills using ANFIS modeling. *IEEE International Conference on Automation*.
- Baylis, Kewe, & Jones. (2020). Mobile drone LiDAR structural data collection and analysis. *Underground Mining Technology 2020*.
- Berrios, J. (2012). *Optimización del revestimiento de molinos de minería*. Lima.
- Ccahuana Churata, A. (2018). *Estudio comparativo del molino SAG 40 gt x 25 ft y el molino convencional de bolas 26 ft x 40 ft en la compañía Antapaccay*. Arequipa.
- Chile, B. (21 de 10 de 2016). *Diario El Día*. Recuperado el 2021, de <https://www.diarioeldia.cl/pais/trabajador-contratista-muere-en-planta-minera-escondida-en-laguna-seca>
- Confederación Regional de Organizaciones Empresariales de Murcia (CROEM). (2018). *Uso de drones aplicado a la prevención de riesgos laborales*. Murcia,

España: Confederación Regional de Organizaciones Empresariales de Murcia (CROEM).

Contreras , J. (2019). *Prototipo de un sistema mecatrónico para el posicionamiento y apilamiento automático de envases plásticos de cuatro litros empleando visión artificial en el sector manufacturero*. Lima, Perú.

CopperAcción. (20 de 12 de 2023). <https://cooperaccion.org.pe/>. Recuperado el 2023 de 12 de 28, de <https://cooperaccion.org.pe/economia-y-mineria-9/>

Dandotiya, R. (2011). *Evaluation of Abrasive Wear Measurements Devices of Mill Liners*. Sweden.

Diaz, R. (2019). *Desarrollo de un sistema de localización de bajo costo para vehículos de guiado automático basado en detección de marcadores de referencia*. Lima.

El Peruano. (2018). Ley que regula el uso y las operaciones de los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS). *El Peruano*.

Emesent. (02 de 2023). *Emesent Hovermap ST*. Recuperado el 12 de 2023, de <https://emesent.com/wp-content/uploads/2023/02/Hovermap-ST-Range-brochure.pdf>

Faro Technologies, Inc. (2021). *Faro Focus Laser Scanner*.

Flyability. (2023). <https://www.flyability.com/es/elios-3>. Recuperado el 10 de 2023, de <https://www.flyability.com/es/elios-3>

Fundación Chile. (2016). *Casos de Innovación de Proveedores en la Minería Chilena*.

gob.pe. (11 de 12 de 2023). *gob.pe/Ministerio de Energía y minas*. Recuperado el 23 de 12 de 15, de <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/3614950-inversion-minera>

Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. (Julio de 2021). Guía Proveedores IIMP 2021. *Revista Minería*, 9-11. Obtenido de Revista Minería: <http://revistamineria.com.pe/guiaproveedores/2021/>

Instituto Peruano de Economia. (2021). *Contribución de la minería a la economía nacional*. Lima - Perú: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía.

Kalachev, O. (2023). <https://chev.me/arucogen/>. Recuperado el 10 de 2023, de <https://chev.me/arucogen/>

Kingdon, G. (2015). *The eye have it: Mejorando la disponibilidad del molino a través de tecnología visual*. SAG Conference 2015.

Lara Sosa, B. M., Fagua Perez, E. Y., Mauricio Salamanca, J., & Higuera Martínez, O. I. (2017). Diseño e implementación de un sistema de control de vuelo para un vehículo aéreo no tripulado tipo cuadricóptero. *Revista Tecnura*.

Leica Geosystems. (08 de 2023). *LEICA BLK2FLY*. Recuperado el 12 de 2023, de https://shop.leica-geosystems.com/sites/default/files/2023-08/BLK2FLY_SpecSheet_V3.pdf

Lynch, A. (2015). *Communion Handbook*. Australia.

Mallqui Antialon, G., & Mallqui Antialon, R. (2022). *Optimización de un sistema de giro para montaje de liners de un molin Osag 40 X 24 pies en una mina ubicada en Moquegua*. Callao.

Matías, R. (2020). *Aplicación de un dron para mejora los procesos productivos en Minera Chinalco Perú S.A., Morococha 2020*. Huancayo.

Metso:Outotec. (2021). *mogroup.com*. Obtenido de <https://www.mogroup.com/products-and-services/parts/mill-liners/megalinermill-liners/>

Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería DS. N° 024-2016-EM modificado por D.S. N° 023-2017-EM*. Lima.

Ministerio de Energía y Minas del Perú. (18 de 08 de 2017). *minem.gob.pe*. Recuperado el 10 de 2023, de https://minem.gob.pe/_legislacionM.php?idSector=1&idLegislacion=10221

Mir Carnicero, E. (2020). *Módulos software para la navegación autónoma de un sistema de un sistema de asistencia a la movilidad basado entorno ROS*. Madrid.

Noriega Fernandez, H. (2006). *Modelo matemático para la estimación de la vida útil de revestimientos en molinos semiautógenos*. Valdivia - Chile.

OpenCV. (2023). *ArUco Marker Detection*. Recuperado el 2023, de https://docs.opencv.org/3.4/d9/d6a/group__aruco.html

OpenCV. (2023). <https://opencv.org/about/>. Recuperado el 19 de 01 de 2023, de <https://opencv.org/about/>

OpenCV. (s.f.). <https://www.opencvhelp.org>. Recuperado el 29 de 12 de 2023, de <https://www.opencvhelp.org/tutorials/best-practices/>

- Pomachagua, J. P. (2019). *Sistema de monitoreo en línea del desgaste de los revestimientos en los molinos convencionales de la unidad minera Uchucchacua*. Lima.
- Reventos Nuñez, A. S. (2020). *Estudio de automatización del cambio de revestimiento de molinos*. Santiago de Chile.
- RIMAC. (20 de 11 de 2019). <https://prevencionlaboralrimac.com/>. Recuperado el 28 de 12 de 2023, de <https://prevencionlaboralrimac.com/articulo/Los-controles-operacionales---base-para-la-mejora-continua>
- Rodríguez, O. A. (2018). *Modelación neuro-difusa del desgaste de alzadores y nivel de llenado de molinos SAG*. Chile.
- Rupay, Rogelio Roly Rojas. (2019). *Incremento de throughput en la etapa de molienda SAG, para la optimización de las variables de la función selección y fractura, en la Compañía Minera Antamina S.A.* Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrion.
- Sostenible, C. p. (2020). *Informe Final, Propuestas de Medidas Normativas, de Gestion y de Politica Publica para Afianzar la Sostenibilidad del Sector Minero*. Lima.
- TECSUP. (2014). *Manual de Operacion - Planta Concentradora*.
- Urrutia Cantillano, J. A. (2018). *Desarrollo de un modelo predictivo para estimar la tasa de desgaste en los revestimientos de un molino SAG en función de sus variables operacionales*. Valparaíso - Chile.

Anexos

Anexo 1: IPERC Línea Base.....	106
Anexo 2: Plano de entorno de molino SAG 40'	107
Anexo 3: Código de programación del algoritmo de visión artificial.....	108

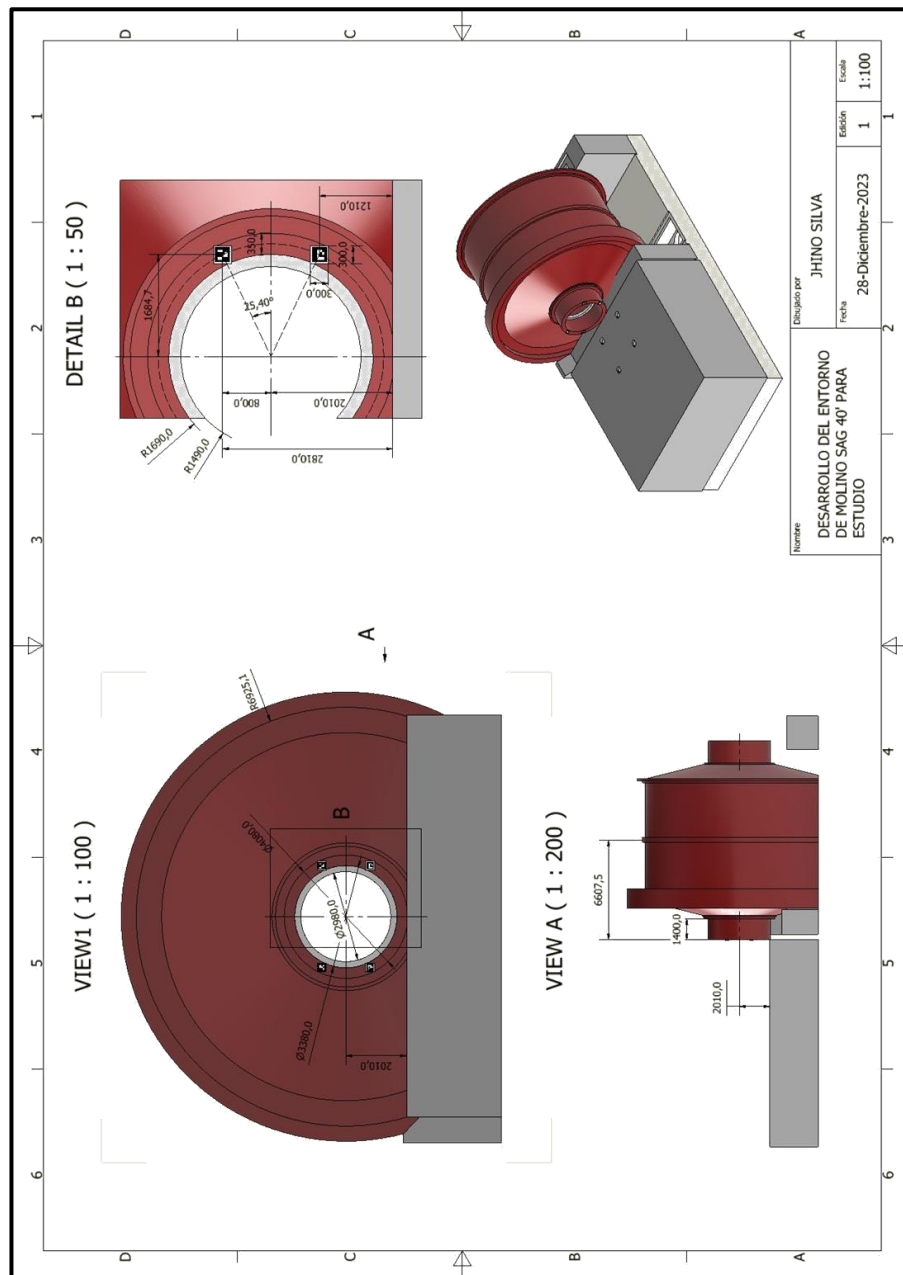
Anexo 1: IPERC Línea Base

La siguiente tabla detalla el formato IPERC Línea base decretado por el gobierno del Perú para ser aplicado en trabajos de alto riesgo el sector de minería.

LOGO EMPRESA	ANEXO N° 8 IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS, EVALUACIÓN DE RIESGOS Y MEDIDAS DE CONTROL- LÍNEA BASE												Código: Versión: Fecha: Página 1 de 1																												
Gerencia : Área: Fecha de elaboración : Fecha de actualización :				Equipo Evaluador :				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td colspan="5" style="text-align: center;">Jerarquía de Controles - Orden de Prioridad</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">1</td><td colspan="4">Eliminación</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2</td><td colspan="4">Sustitución</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">3</td><td colspan="4">Controles de Ingeniería</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4</td><td colspan="4">Señalización, Alertas y/o Control Administrativo</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">5</td><td colspan="4">EPP adecuado</td></tr> </table>				Jerarquía de Controles - Orden de Prioridad					1	Eliminación				2	Sustitución				3	Controles de Ingeniería				4	Señalización, Alertas y/o Control Administrativo				5	EPP adecuado			
Jerarquía de Controles - Orden de Prioridad																																									
1	Eliminación																																								
2	Sustitución																																								
3	Controles de Ingeniería																																								
4	Señalización, Alertas y/o Control Administrativo																																								
5	EPP adecuado																																								
Proceso	Actividad	Tarea	Peligros	Riesgos	Evaluación de Riesgos			Jerarquía de Control				Reevaluación			Acción de Mejora	Responsable																									
					Nivel Probabilidad (P)	Nivel Severidad (S)	Clasific de Riesgo (P x S)	Eliminación	Sustitución	Controles de Ingeniería	Control Administrativo	EPP	P	S			PxS																								

Anexo 2: Plano de entorno de molino SAG 40'

En la siguiente imagen se muestran las dimensiones del gemelo digital obtenidos a partir del levantamiento con escáner 3D en una operación real de SAG 40'.



Anexo 3: Código de programación del algoritmo de visión artificial

Se describe el código en lenguaje Python que permite calcular la posición relativa del centro de la cámara respecto al centro de las marcas Aruco visible, así mismo imprime los valores numéricos necesarios para mover en sus 6 grados de libertad con el objetivo de posicionar la cámara de manera coplanar y concéntrica a la marca Aruco más cercana identificada.

```
1 import cv2 as cv2
2 from cv2 import aruco
3 import numpy as np
4 import math
5
6 # Tamaño de marca en mm
7
8 MARKER_SIZE = 150
9
10 #Cargar detector Aruco
11
12 marker_dict = aruco.Dictionary_get(aruco.DICT_4X4_250)
13 param_markers = aruco.DetectorParameters_create()
14
15 #Cargar imagen a analizar
16
17 cap = cv2.VideoCapture("http://192.168.0.1:8080/videofeed")
18
19 lx = int(cap.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH))
20 ly = int(cap.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT))
21 lx0 = int(lx/2)
22 ly0 = int(ly/2)
23
24
25 #Cargar parámetros de calibración de cámara
26 # CALIB Resolución 1920x1080
27
28 intrinsic_camera = np.array(((1528.0000,0, 986.825),(0,1528.3251,537.2497),(0,0,1)))
29 distortion = np.array((0.06075,-0.20835,0.001320,0.006883,0.383541))
30
31
32 cam_mat = intrinsic_camera
33 dist_coef = distortion
34
35 # Crear lista de centros
36 marker_centers = []
37
38
39 # Cálculo de ángulos Euler
40 def rotationMatrixToEulerAngles(R):
41     # Calcula ángulos de Euler a partir de una matriz de rotación
42     sy = math.sqrt(R[0, 0] * R[0, 0] + R[1, 0] * R[1, 0])
43     singular = sy < 1e-6
44     if not singular:
45         x = math.atan2(R[2, 1], R[2, 2])
46         y = math.atan2(-R[2, 0], sy)
47         z = math.atan2(R[1, 0], R[0, 0])
48     else:
49         x = math.atan2(-R[1, 2], R[1, 1])
50         y = math.atan2(-R[2, 0], sy)
51         z = 0
52     return x, y, z
```

```

53 #Lectura de marcas
54
55 while True:
56     ret, frame = cap.read()
57
58     if not ret:
59         break
60     gray_frame = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
61     marker_corners, marker_ids, reject = aruco.detectMarkers(gray_frame, marker_dict, parameters=param_markers)
62
63     if marker_corners:
64         rVec, tVec, _ = aruco.estimatePoseSingleMarkers(marker_corners, MARKER_SIZE, cam_mat, dist_coef)
65         total_markers = range(0, marker_ids.size)
66
67         # Determina qué marca está más cerca en términos de distancia 3D *4
68         min_distance = float('inf')
69         closest_index = -1
70         for i, t in enumerate(tVec):
71             distance = np.linalg.norm(t) # Calcula la distancia euclidiana
72             if distance < min_distance:
73                 min_distance = distance
74                 closest_index = i
75
76         # Procesa sólo la marca más cercana
77         if closest_index >= 0:
78             closest_id = int(marker_ids[closest_index][0])
79             rotation_matrix, _ = cv2.Rodrigues(rVec[closest_index])
80             pitch, yaw, roll = rotationMatrixToEulerAngles(rotation_matrix)
81
82             # Convertir ángulos a grados
83             pitch_deg = 180-pitch*180/math.pi
84             yaw_deg = yaw*180/math.pi
85             roll_deg = roll*180/math.pi
86
87             # Mostrar ángulos y traslación
88             print(f"Marca Aruco más cercana: ID = {closest_id}")
89             print(f"Ángulos para alinear la cámara: Pitch: {pitch_deg:.2f}°, Yaw: {yaw_deg:.2f}°, Roll: {roll_deg:.2f}°")
90             print(f"Traslación necesaria en mm: X: {tVec[closest_index][0][0]:.2f}, Y: {-tVec[closest_index][0][1]:.2f}, Z: {tVec[closest_index][0][2]:.2f}")
91
92     for ids, corners, i in zip(marker_ids, marker_corners, total_markers):
93
94         #Codigo fuente
95
96         cv2.polylines(frame, [corners.astype(np.int32)], True, (0, 255, 255), 1, cv2.LINE_AA)
97
98         corners = corners.reshape(4, 2)
99         corners = corners.astype(int)
100         top_right = corners[0].ravel()
101         top_left = corners[1].ravel()
102         bottom_right = corners[2].ravel()
103         bottom_left = corners[3].ravel()
104
105         point = cv2.drawFrameAxes(frame, cam_mat, dist_coef, rVec[i], tVec[i], 128, 4)
106
107         distance = np.sqrt(tVec[i][0][2] ** 2 + tVec[i][0][0] ** 2 + tVec[i][0][1] ** 2)
108         angle = np.degrees(np.arccos((np.sqrt(tVec[i][0][2] ** 2 + tVec[i][0][0] ** 2))/distance))
109         if tVec[i][0][1] > 0:
110             angle = -angle
111
112         cv2.putText(frame, f"ID: {ids[0]} Dist: {round(distance, 1)} Ang: {yaw_deg:.2f} °", top_right, cv2.FONT_HERSHEY_PLAIN, 3.3, (0, 255, 255), 2, cv2.LINE_AA,)
113
114     cv2.line(frame, (0, ly0), (lx, ly0), (255, 0, 0), 1)
115     cv2.line(frame, (lx0, 0), (lx0, ly), (255, 0, 0), 1)
116
117     cv2.imshow("Test Aruco", frame)
118
119     key = cv2.waitKey(1)
120     if key == ord("q"):
121         break
122
123 cap.release()
124 cv2.destroyAllWindows()

```