

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



**FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA
PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN
EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTELS**
(Art. 45° de la ley N° 30220 – Ley)

Autorización de la propiedad intelectual del autor para la publicación de tesis en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur (<https://repositorio.unfels.edu.pe>), de conformidad con el Decreto Legislativo N° 822, sobre la Ley de los Derechos de Autor, Ley N° 30035 del Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, Art. 10° del Rgto. Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales en las universidades – RENATI Res. N° 084-2022-SUNEDU/CD, publicado en El Peruano el 16 de agosto de 2022; y la RCO N° 061-2023-UNTELS del 01 marzo 2023.

TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

- 1). TESIS () 2). TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL (x)

DATOS PERSONALES

Apellidos y Nombres:	Meza Callapiña Jose Luis
D.N.I.:	48106799
Otro Documento:	
Nacionalidad:	Peruano
Teléfono:	916513155
e-mail:	jimeza10ca@gmail.com

DATOS ACADÉMICOS

Pregrado

Facultad:	Facultad de Ingeniería y Gestión
Programa Académico:	Trabajo de Suficiencia Profesional
Título Profesional otorgado:	Ingeniero Mecánico Electricista

Postgrado

Universidad de Procedencia:	
País:	
Grado Académico otorgado:	

Datos de trabajo de investigación

Título:	"Implementación de un Sistema para el Brazo del Equipo de Perforación Subterráneo de Taladros Largos Little Hammer"
Fecha de Sustentación:	14 de diciembre 2024
Calificación:	Aprobado por Unanimidad
Año de Publicación:	2025



AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN VERSIÓN ELECTRÓNICA

A través de la presente, autorizo la publicación del texto completo de la tesis, en el Repositorio Institucional de la UNTELS especificando los siguientes términos:

Marcar con una X su elección.

- 1) Usted otorga una licencia especial para publicación de obras en el REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR.

Si autorizo No autorizo

- 2) Usted autoriza para que la obra sea puesta a disposición del público conservando los derechos de autor y para ello se elige el siguiente tipo de acceso.

Derechos de autor		
TIPO DE ACCESO	ATRIBUCIONES DE ACCESO	ELECCIÓN
ACCESO ABIERTO 12.1(*)	info:eu-repo/semantics/openAccess (Para documentos en acceso abierto)	(X)

- 3) Si usted dispone de una **PATENTE** puede elegir el tipo de **ACCESO RESTRINGIDO** como derecho de autor y en el marco de confiabilidad dispuesto por los numerales 5.2 y 6.7 de la directiva N° 004-2016-CONCYTEC DEGC que regula el Repositorio Nacional Digital de CONCYTEC (Se colgará únicamente datos del autor y el resumen del trabajo de investigación).

Derechos de autor		
TIPO DE ACCESO	ATRIBUCIONES DE ACCESO	ELECCIÓN
ACCESO RESTRINGIDO	info:eu-repo/semantics/restrictedAccess (Para documentos restringidos)	()
	info:eu-repo/semantics/embargoedAccess (Para documentos con períodos de embargo. Se debe especificar las fechas de embargo)	()
	info:eu-repo/semantics/closedAccess (para documentos confidenciales)	()

(*) <http://renati.sunedu.gob.pe>



UNIVERSIDAD NACIONAL
TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

Rellene la siguiente información si su trabajo de investigación es de acceso restringido:

Atribuciones de acceso restringido:

Motivos de la elección del acceso restringido:

Meza Callapiña Jose Luis

APELLIDOS Y NOMBRES

48106799

DNI

Firma y huella:



Lima, 30 de enero del 20 25

UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INCLINACIÓN PARA EL BRAZO
DEL EQUIPO DE PERFORACIÓN SUBTERRANEO DE TALADROS LARGOS
LITTLE HAMMER”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR EL BACHILLER

MEZA CALLAPIÑA, JOSE LUIS

ORCID: 0009-0003-2769-5308

ASESOR

ZEGARRA CHOQUE, FABIO

ORCID: 0000-0002-7113-5100

Villa El Salvador

2024



VII Programa de Titulación por la Modalidad de Trabajo de Suficiencia Profesional
Facultad de Ingeniería y Gestión

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OBTENER EL
TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

En Villa El Salvador, siendo las 16:30 horas del día 14 de diciembre de 2024, reunidos en las instalaciones de la UNTELS, los miembros del Jurado Evaluador, integrado por:

PRESIDENTE: ROBERTO PFUYO MUÑOZ ORCID N°0000-0002-9131-3904 Colegiatura N°46900
SECRETARIO: RICHARD FLORES CACERES ORCID N°0000-0001-6773-3872 Colegiatura N°185839
VOCAL : JORGE AUGUSTO SANCHEZ AYTE ORCID N°0000-0001-9734-3381 Colegiatura N°110166

Nombrados con RESOLUCIÓN DE DECANATO N°232-2024-UNTELS-R-D, de fecha 12 de diciembre de 2024, quienes dan inicio a la Sesión Pública de Sustentación del Trabajo de Suficiencia Profesional.

Acto seguido, el aspirante al Título Profesional en **Ingeniero Mecánico Electricista**.

Don: **JOSE LUIS MEZA CALLAPIÑA** identificado(a) con D.N.I. N°48106799; procedió con la Sustentación del Trabajo de Suficiencia Profesional Titulado:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INCLINACIÓN PARA EL BRAZO DEL EQUIPO DE PERFORACIÓN
SUBTERRANEO DE TALADROS LARGOS LITTLE HAMMER**

Autorizado mediante RESOLUCIÓN DE DECANATO N°234-2024-UNTELS-R-D, de fecha 12 de diciembre de 2024, de conformidad con las disposiciones del Reglamento General para el Otorgamiento de Grado Académico y Título Profesional vigente, sustentó y absolvió las interrogantes que le formularon los señores miembros del Jurado Evaluador.

Concluida la Sustentación se procedió a la evaluación y calificación correspondiente, de acuerdo al Art. 57° del Reglamento General para optar el Título Profesional.

CALIFICACIÓN		CONDICIÓN	EQUIVALENCIA
NÚMERO	LETRAS		
<u>15</u>	<u>QUINCE</u>	<u>APROBADO POR UNANIMIDAD</u>	<u>BUENO</u>

Siendo las 17:00pm horas del día 14 de diciembre de 2024, se dio por concluido el acto de sustentación, firmando el jurado evaluador el Acta de Sustentación y con firma del sustentante en señal de conformidad.

ROBERTO PFUYO MUÑOZ
PRESIDENTE

RICHARD FLORES CACERES
SECRETARIO

JORGE AUGUSTO SANCHEZ AYTE
VOCAL

JOSE LUIS MEZA CALLAPIÑA
BACHILLER

Nota: Artículo 50°. - Para el inicio y desarrollo de la sustentación se requiere la presencia física y permanente de los integrantes del jurado. De faltar algún miembro del jurado, la sustentación procederá con los dos integrantes presentes. En caso de ausencia del presidente del jurado, ésta será asumida por el jurado de mayor categoría y antigüedad. En caso de ausencia de dos (02) integrantes del jurado, se suspenderá el acto de sustentación, pudiendo reprogramarse dentro de los cinco (05) días hábiles siguientes, sin perjuicio de aplicar el artículo 62° del presente Reglamento.

DEDICATORIA:

A Dios por darme las fuerzas suficientes para culminar esta meta.

A mis padres, María Luz y Gregorio, por su apoyo y motivación para seguir adelante.

También a mis queridos hermanos, por su apoyo moral y consejos durante mi etapa profesional.

Por último, a las personas que creyeron en mí, por hacerme reaccionar cuando pensaba que no podía seguir más.

AGRADECIMIENTO:

Agradezco de manera cordial a mi asesor por la dedicación y paciencia en cada palabra y corrección precisa para culminar este objetivo.

Y a la universidad, mi alma mater, por la exigencia de su sistema educativo, pero al mismo tiempo agradecerle por haberme permitido obtener mi tan ansiado título.

ÍNDICE

RESUMEN	vii
INTRODUCCIÓN	viii
CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Delimitación Temporal y Espacial del Trabajo	3
1.3 Objetivos	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Antecedentes	5
2.1.1 Antecedentes Nacionales	5
2.1.2 Antecedentes Internacionales.....	6
2.2 Bases Teóricas	8
2.2.1 Minería Subterránea en el Perú.....	8
2.2.2 Estado de Tecnología Actual	14
2.2.3 Sensor MPU6050	25
2.2.4 Arduino uno R3.....	28
2.2.5 Pantalla LCD 4x20 con I2C.....	30
2.3 Definición de Términos Básicos.....	31
CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO PROFESIONAL	34
3.1 Determinación y Análisis del Problema.....	35
3.2 Modelo de Solución Propuesto	39
3.2.1 Diseño del Sistema de Inclinación	40
3.2.2 Implementación del Sistema de Inclinación	49
3.2.3 Análisis de los Beneficios de la Implementación del Sistema de Inclinación .	51
3.3 Resultados	58
3.3.1 Resultado 1	58
3.3.2 Resultado 2.....	59
3.3.3 Resultado 3.....	60
CONCLUSIONES.....	62
RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXOS	68

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de la Empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L.	3
Figura 2 Trabajadores de la Mina Inspeccionando el Área de Trabajo	9
Figura 3 Porcentaje de Territorio de las Actividades Mineras en el Perú	11
Figura 4 Ciclo de Minado en una Minería Subterránea	13
Figura 5 Sistema de Control por Red (RCS) del Equipo Jumbo DL421 de Sandvik	14
Figura 6 Equipo Epiroc de Taladros Largos Simba S7.....	15
Figura 7 Monitor del RCS5 del Simba ME7C	16
Figura 8 Equipo Sandvik de Taladros Largos Sandvik DL422iE	18
Figura 9 Sistema de Baterías de Sanvik	19
Figura 10 Equipo Resemin de Taladros Largos Muki LHBP 2R.....	20
Figura 11 Sistema AMLH (Angle Measurement Long Hole) de Muki LHBP 2R	21
Figura 12 Equipo KLEF de Taladros Largos Little Hammer	22
Figura 13 Sensor MPU6050	25
Figura 14 Sensor MPU6050 Aplicado en la Aeronáutica.....	27
Figura 15 Arduino Uno R3.....	29
Figura 16 Pantalla LCD 4x20 con I2C	30
Figura 17 Colaborador de la Empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. Realizando Trabajos de Rutina	34
Figura 18 Equipo Little Hammer Realizando una Perforación en Positivo con un Ángulo de 45° de Inclinación.....	35
Figura 19 Diagrama de Flujo del Proceso de Perforación	38
Figura 20 Dirección de los Ejes del Sensor MPU6050	40
Figura 21 Conexión del Arduino y el Sensor MPU6050	41
Figura 22 Diagrama de Flujo de la Programación para Obtener el OFFSETS.....	43
Figura 23 Librerías y Contantes para el Sensor MPU6050	44
Figura 24 Definición de Caracteres para la Iniciación del Programa.....	45
Figura 25 Sketch para la Obtención de Datos, Muestra en Monitor Serie y Pantalla LCD.....	46
Figura 26 Configuración de la Pantalla LCD 4x20.....	47

Figura 27 Definición de OFFSETS Según el Área de Trabajo	48
Figura 28 Sensor MPU6050 y la Placa Arduino Uno R3	49
Figura 29 Pantalla LCD 4x20 Conectado a un Cable Apantallado de 4 Hilos	50
Figura 30 Conexiones del Sistema de Inclinación	51
Figura 31 Comparación del Antes y Después de la Medición del Ángulo del Brazo del Equipo Little Hammer	52
Figura 32 Taladro Realizado Antes y Después de la Implementación del Sistema de Inclinación	53
Figura 33 Exposición al Riesgo de Caída de Objetos Pesados del Ayudante de Taladros Largos	56
Figura 34 Taladros Realizados con la Implementación del Sistema de Inclinación	57
Figura 35 Compilación del Programa en el Monitor Serie de Arduino	58
Figura 36 Implementación del Sistema en el Equipo Little Hammer	59

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Comparación de Características Técnicas de los Equipos de Taladros Largos	23
Tabla 2 Comparación de Características del Sistema de los Equipos de Taladros Largos	24
Tabla 3 Parámetros Principales de la Perforación del Equipo Little Hammer	36
Tabla 4 Conexión de Sensor MPU6050 con 3 Tipos de Placa Arduino	42
Tabla 5 Tiempos de Realización de 5 Perforaciones	54
Tabla 6 Reducción de Tiempo de Cada Taladro Realizado en Porcentajes	55
Tabla 7 Reducción de Tiempo de Cada Perforación en Porcentaje.	60
Tabla 8 Exposición de Riesgo del Ayudante de Taladros Largos	61
Tabla 9 Desviación de Taladros Largos del Equipo Little Hammer	61

RESUMEN

La actividad minera subterránea se caracteriza por sus altos niveles de riesgo. En este contexto, la precisión en las operaciones es fundamental para garantizar la seguridad de los trabajadores y la eficiencia de los procesos. Sin embargo, en la empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. Se ha identificado una deficiencia en la medición de los ángulos del brazo del equipo Little Hammer durante la perforación de taladros largos. Esta imprecisión provoca desviaciones en las perforaciones, incrementando los tiempos de ejecución y exponiendo al ayudante del equipo a riesgos adicionales.

Este trabajo de investigación se centra en el diseño, implementación y evaluación de un sistema de inclinación para el brazo del equipo de perforación Little Hammer, utilizado en operaciones de minería subterránea. La finalidad principal es mejorar la precisión, la eficiencia y la seguridad durante la perforación, reduciendo riesgos asociados al trabajo manual. El sistema desarrollado incluye un sensor MPU6050, que mide los ángulos de inclinación en los ejes X, Y y Z, integrado con un Arduino Uno y una pantalla LCD para la visualización de los datos en tiempo real. Este sistema fue probado en condiciones reales, abordando problemas como la dificultad de posicionamiento del brazo y los riesgos de caída de rocas o objetos pesados que enfrentan los operarios.

Los resultados obtenidos demostraron una mejora significativa en la precisión del posicionamiento del brazo perforador, reduciendo las desviaciones angulares en casi un 50% y optimizando los tiempos de ciclo hasta en un 30%. Además, se logró disminuir la exposición del personal a riesgos laborales, aumentando la seguridad de las operaciones.

En conclusión, la implementación de este sistema de inclinación no solo optimiza la eficiencia operativa del equipo Little Hammer, sino que también establece una base tecnológica que puede ser utilizada para desarrollar sistemas de control más avanzados en equipos similares. Esta solución responde a las necesidades del sector minero de modernizar sus herramientas para enfrentar desafíos operativos y garantizar un entorno de trabajo más seguro.

INTRODUCCIÓN

La perforación de rocas con taladros largos o barrenos largos es uno de los tipos de perforación más importantes dentro de la minería subterránea, debido a que es considerado un ciclo de avance de perforación de producción para poder extraer el mineral, es por ello la importancia que este procedimiento se realice con precisión, con la finalidad que sea eficiente. Por ende, que brinde la seguridad necesaria para el operador y ayudante.

La mayoría de los equipos de perforación de taladros largos o barrenos largos cuentan con un sistema de control eléctrico (ECS) o un sistema de control por red (RCS) que les permite tener una buena lectura de parámetros y una nivelación automática, en consecuencia, son más eficientes en el área de trabajo y sin riesgos de caída de rocas al operador y ayudante.

El equipo Little Hammer del fabricante KLEF Sistemas Electrohidráulicos E.I.R.L. cuenta con un sistema de control directo (DCS), es decir que el control de posicionamiento son 100% hidráulicos, esto hace que el equipo presente dificultades en el posicionamiento preciso del brazo durante la perforación a diferentes ángulos. Esto genera ineficiencias en el proceso y exposición a riesgos de caídas de objetos pesados o caída de rocas sueltas.

Con el fin de aumentar la eficiencia en la perforación y evitar futuros accidentes en la perforación taladros largos del equipo Little Hammer. Se ha diseñado, implementado y evaluado un sistema de inclinación en el equipo de perforación subterránea Little Hammer que permitirá mejorar la precisión y la eficiencia de las operaciones de perforación, reducir los tiempos de ciclo y minimizar los riesgos asociados a la operación manual. Además, esta investigación podría servir como base para el desarrollo de sistemas de control más avanzados en equipos de perforación similares dentro de la empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L.

Para ello se ha seleccionado una unidad de medida inercial (IMU) MPU6050 con 6 grados de libertad para poder medir el ángulo de inclinación del brazo en los ejes X, Y y Z. Este sensor cuenta con un acelerómetro de tres ejes con lo que podemos medir los componentes X, Y y Z de la aceleración de la gravedad y también cuenta con un giroscopio de tres ejes con los que medimos la velocidad angular usando el efecto Coriolis.

El resultado final es un equipo con un control del movimiento del brazo perforador que lo hace más eficiente y preciso, así como la lectura de los ángulos de inclinación en los tres ejes que se visualizan en una pantalla.

CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES

1.1 Contexto

Descripción de la Empresa

KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. es una empresa privada de capital peruano que está ubicado en el departamento de Lima distrito Ate, esta empresa desde los inicios se dedicó a prestar servicio de calidad así también como en la fabricación de equipos jumbos para el sector minero.

La empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. es un referente en la fabricación, reparación y mantenimiento de equipos jumbos con sistemas electrohidráulicos, especializados en el exigente sector minero subterráneo. Ofreciendo un portafolio de servicios de alta calidad, respaldado por un equipo altamente capacitado y comprometido.

Expertos en sostenimiento minero, ofrecen una amplia gama de soluciones personalizadas, incluyendo la instalación de Swellex, Split Set, pernos helicoidales, Hydrabolt y malla electrosoldada. Su flota de equipos jumbos, combinada con su compromiso con la sostenibilidad y la seguridad, les permite optimizar la productividad y la estabilidad de las operaciones mineras de sus clientes.

Misión

La misión de la empresa KLEF es crear soluciones para el sector minero con la fabricación de equipos jumbo con base en la innovación y prestando un servicio de calidad para tener una alta competitividad en el mercado. Asimismo, tener una respuesta efectiva a las exigencias del sector minero.

Visión

Su visión es ser la empresa líder por excelencia en la fabricación de equipos jumbos en el sector minero. Con una proyección de crecer en los mercados internacionales con nuevas tecnologías e innovadoras.

Servicios

Dentro de los servicios que brinda la empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. está la perforación de taladros largos ya sean paralelos (positivos, negativos e inclinados) o radiales (abanico), también está el sostenimiento subterráneo que es realizado mediante instalaciones de swellex, Split set, pernos helicoidales e hydrabolt a ello también realizan sostenimiento con mallas electrosoldadas de acuerdo a las especificaciones y necesidades de las operaciones mineras y por último esta la reparación y mantenimiento de sus equipos.

Productos

Los equipos fabricados por la empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. están Hammer Bolt, Colibri, Little Hammer, Liebre y Rino. Entre ellos el más destacado es el equipo Little Hammer y el trabajo que realiza en la mina subterránea es de perforación de taladros largos.

La empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. realizó actividades en unidades de mineras subterráneas como Nyrstar, Volcán, Los Quenuales, Sociedad Minera Corona, Alpayana, Catalina Huanca y Argentum. Actualmente se encuentra operando en la Unidad Minera Morococha realizando perforación de taladros largos con su equipo Little Hammer y sostenimiento subterráneo con su equipo Hammer Bolt.

1.2 Delimitación Temporal y Espacial del Trabajo

Delimitación Temporal

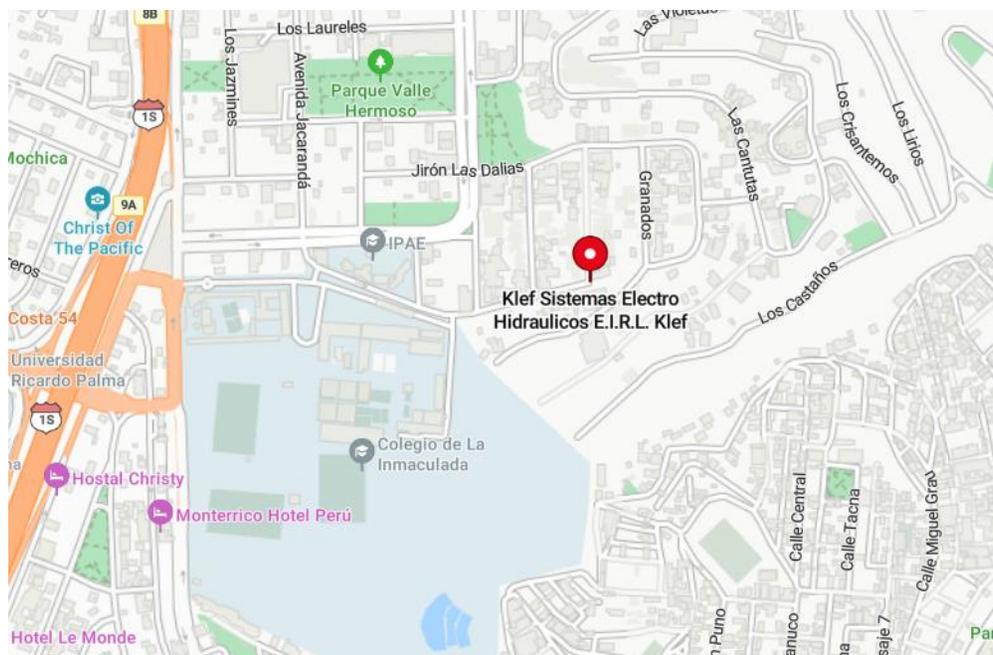
El tiempo total aproximado que duro el trabajo de suficiencia profesional fue de 3 meses desde marzo hasta junio del presente año, durante este periodo se realizó el estudio y la elaboración de informes para su ejecución, posteriormente la fabricación y programación del dispositivo de inclinación y por último la implementación del dispositivo en el equipo Little Hammer para su posterior prueba de campo.

Delimitación Espacial

Este proyecto de suficiencia profesional, centrado en el análisis de la perforación del equipo Little Hammer de la empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L., se circunscribe al área operativa ubicada en calle los cipreses, Urb. Villa susana, distrito de ATE, departamento de Lima, Perú. La Figura 1 presenta la localización geográfica precisa de esta sede.

Figura 1

Ubicación de la Empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L.



Nota. La ubicación no está actualizada debido a que se tomó como referencia Google Maps. De dominio público.

1.3 Objetivos

Objetivo 1

Diseñar un sistema de inclinación para el brazo del equipo de taladros largos Little Hammer que permita controlar de forma precisa los ángulos de inclinación.

Objetivo 2

Implementar un sistema de inclinación en el brazo del equipo de taladros largos Little Hammer para evaluar su desempeño.

Objetivo 3

Analizar los beneficios obtenidos con la implementación del sistema de inclinación en el brazo del equipo de taladros largos Little Hammer en relación a eficiencia, precisión y seguridad.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes Nacionales

Mendoza y Liberato (2023) en su trabajo de suficiencia profesional titulado *Evaluación de la Etapa de Perforación de Taladros Largos en Vetas Angostas Mediante el Enfoque Lean Six Sigma para Incrementar la Productividad Operacional de una Mina Subterránea al Sur de Perú*, realizada en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, tuvo como objetivo principal evaluar la etapa de perforación de taladros largos en vetas angostas mediante el enfoque Lean Six Sigma para incrementar la productividad operacional de una mina subterránea al sur de Perú. Dicha propuesta propone la metodología Lean Six Sigma como un marco de trabajo innovador para la optimización de procesos. Esta metodología, al combinar los principios de Lean y las herramientas estadísticas de Six Sigma, ofrece un enfoque estructurado para identificar y eliminar las causas raíz de los problemas, mejorando así la eficiencia y la calidad. Los resultados de la evaluación piloto indican que el enfoque Lean Six Sigma ha sido eficaz para identificar los principales factores que influyen en la eficiencia de la perforación de taladros largos en vetas angostas. La aplicación de esta metodología ha demostrado su versatilidad y adaptabilidad a entornos operativos complejos como la minería subterránea. Esto ha permitido identificar a grandes rasgos los principales factores que incurren en el problema estudiado.

Camargo (2020) en su tesis profesional titulado *Mapeo de Procesos en Minería con Fines de Seguridad y Control en la Unidad Vinchos de la Empresa Volcan*, realizado en la Universidad Nacional Del Centro Del Perú, Huancayo, tuvo como objetivo llevar a cabo un mapeo detallado de los procesos productivos en la unidad Vinchos de la empresa Volcan, con la finalidad de identificar y evaluar los riesgos laborales existentes, así como establecer medidas de control adecuadas. El método utilizado como el mapeo de procesos en la unidad de Vinchos, realizado en 2014, permitió identificar una compleja red de actividades tanto en superficie como en mina. Para analizar los riesgos laborales asociados, se diseñó una matriz IPERC Base y se aplicó un análisis estadístico con SPSS 22. Los resultados muestran una correlación altamente significativa entre el mapeo

de procesos y la gestión de riesgos, lo que confirma la utilidad de esta herramienta para identificar y mitigar los peligros en la operación minera. A través de este análisis, se propondrán medidas de control y prevención específicas para cada riesgo identificado en una unidad minera subterránea, con el fin de minimizar la probabilidad de ocurrencia de accidentes y enfermedades laborales.

Ortis (2019) en su tesis titulado *Control de Aceros de Perforación de Jumbos Para su Optimización y Reducción de Costos en la Compañía Minera Casapalca S.A.*, realizada en la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, tuvo como objetivo principal implementar un control adecuado en el uso de aceros y así mismo optimizar en consumo de los mismos. La implementación de controles mediante tablas dinámicas en Excel de los aceros de perforación en la Compañía Minera Casapalca ha generado un impacto positivo en la eficiencia y rentabilidad de las operaciones. Al extender la vida útil de las brocas, barras y acoples, se han reducido significativamente los costos asociados a la perforación y voladura. Estos controles con tablas dinámicas permiten un seguimiento detallado del estado de los equipos y materiales, contribuyendo a una gestión más eficiente de los procesos.

2.1.2 Antecedentes Internacionales

Barrera (2023) en su tesis profesional titulado *Condiciones de Trabajo en una Compañía del Sector Minero, Segovia, Antioquia*, realizada en la Universidad Nacional De Colombia, Colombia, tuvo como objetivo principal evaluar las condiciones laborales en la extracción de minerales subterránea de una minera, considerando los factores ambientales, operacionales y organizacionales inherentes a cada etapa del proceso productivo. Utilizando el análisis de las características sociodemográficas de la población que labora en las mineras subterráneas así también como la identificación y descripción de las condiciones de trabajo en la extracción de minerales llegó a una conclusión que investigación en minería de oro de socavón ha crecido exponencialmente desde el año 2000, con un aumento de hasta siete veces por década, es notable la escasez de estudios que se centren específicamente en las condiciones laborales de los mineros. La mayor parte de la investigación se ha enfocado en aspectos sociales, ambientales y

económicos de la pequeña y mediana minería, dejando un vacío de conocimiento sobre las condiciones de trabajo en los socavones.

Fernández (2023) en su tesis profesional titulado *Modelos de Estimación de Probabilidad de Caída de Rocas en Minería Subterránea*, realizada en la Universidad De Oviedo, Chile, tuvo como objetivo principal mejorar la predicción y cuantificación de caídas de rocas en minas a través del análisis de datos geotécnicos recopilados en las primeras etapas de un proyecto minero. Este estudio presento una nueva metodología gráfica para evaluar el potencial de formación de bloques en las paredes de excavaciones mineras. A través de un análisis detallado de siete minas chilenas, combinando datos geotécnicos y fotografías. En la cual se desarrolló un modelo predictivo preciso para estimar el riesgo de caída de rocas, contribuyendo así a mejorar la seguridad en las operaciones mineras. De esta manera, es posible identificar las zonas con mayor potencial de inestabilidad y adoptar medidas de control adecuadas para garantizar la seguridad de las operaciones. En conclusión, los datos obtenidos nos han permitido establecer un rango de desviaciones radiales en los barrenos largos, clasificándolas según su comportamiento a lo largo de la profundidad. Esta información resulta fundamental para optimizar el diseño y la ejecución de las voladuras, mejorando así la eficiencia y seguridad de las operaciones. Además, al contar con datos reales de tiempo de medición, podemos establecer parámetros de referencia para futuras campañas, agilizando los procesos y reduciendo costos.

Laguillo (2022) en su tesis doctoral titulado *Desarrollo e Implementación de un Sistema de Medición de Barrenos en Minas de Interior*, realizada en la Universidad Politécnica de Madrid, España, tuvo como objetivo desarrollar un sistema de medición de barrenos para minería subterránea. Se ha desarrollado una sonda mecánica innovadora. Equipada con una unidad de medida inercial (IMU) y centradores, esta sonda se integra directamente en la carga explosiva. Gracias a un sistema de visualización en tiempo real en un dispositivo portátil, el operador puede monitorear los datos desde una zona segura y tomar decisiones informadas. Además, un indicador de calidad basado en la elipse de desviación estándar garantiza la confiabilidad de cada medición, minimizando la necesidad de repetir tareas y asegurando así resultados precisos.

Salvador (2020) en su tesis titulado *Evaluación de Automatización de Operaciones Unitarias en Minería Subterránea*, realizada en la Universidad De Chile, Chile, tuvo como objetivo la evaluación del potencial de automatización en todas las operaciones de una mina subterránea, desde la extracción hasta las labores de mantenimiento. La metodología empleada en esta investigación consiste en un análisis detallado de las operaciones, evaluando su nivel de automatización actual y su potencial futuro. Se considera el riesgo inherente a cada operación y se cuantifica el beneficio potencial de su automatización en términos de costos, tiempo y seguridad. Finalmente, se realiza una evaluación integral del impacto de la automatización, tanto cualitativa como cuantitativamente. En conclusión, La automatización en la minería subterránea disminuye drásticamente la probabilidad de accidentes al reducir la exposición directa de los trabajadores a entornos peligrosos. A través de este análisis, se busca identificar los procesos más adecuados para su automatización, así como los beneficios y desafíos asociados a su implementación.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Minería Subterránea en el Perú

Perú posee una abundante diversidad de recursos naturales, que incluyen biodiversidad, recursos hídricos, suelos, recursos forestales, y reservas de hidrocarburos. “El Perú cuenta con una variedad gama de recursos naturales entre los cuales destacan: la biodiversidad, el agua, suelos y los recursos hidrobiológicos, forestales, gas y petróleo” (Luna, 2011, p. 2). Esta riqueza natural, profundamente arraigada en la cultura ancestral peruana, se encuentra estrechamente vinculada a la actividad minera. El desafío actual consiste en conciliar el desarrollo de la actividad minera y energética con la preservación del medio ambiente y la promoción de un desarrollo sostenible.

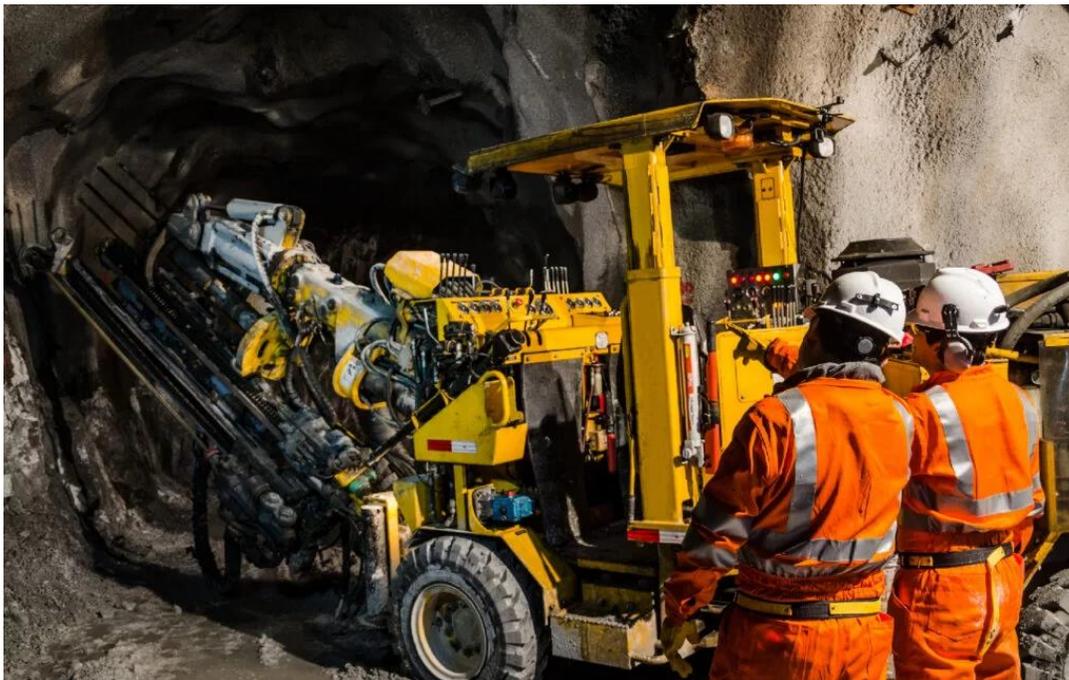
La minería subterránea consiste en la extracción de minerales a través de excavaciones realizadas por debajo de la superficie terrestre. Esta modalidad se emplea cuando las condiciones geológicas, económicas o ambientales no permiten la explotación a cielo abierto, requiriendo la construcción de una compleja red de túneles, pozos y galerías para acceder al yacimiento.

A pesar de que la minería a tajo abierto concentra el 78% de la producción minera nacional, la minería subterránea presenta una mayor cantidad de operaciones, representando cerca del 65% del total de unidades mineras en el país. Esto indica que, si bien cada mina subterránea produce menos volumen, la suma de todas ellas constituye una parte significativa de la actividad minera peruana.

La minería subterránea emplea maquinaria de menor tamaño en comparación con la minería a cielo abierto debido a las restricciones impuestas por los espacios confinados de las galerías. Sin embargo, esta industria ha experimentado un notable avance tecnológico, incorporando equipos robotizados y teleoperados que minimizan los riesgos laborales y son más eficientes al momento de la perforación de rocas.

Figura 2

Trabajadores de la Mina Inspeccionando el Área de Trabajo



Nota. Antes de realizar un trabajo en una mina subterránea se hace una inspección de labor para prevenir algún tipo de accidente de caída de rocas o bancos. Recuperado de la Posada, por la Posadainfo, 2021 (<https://posada.pe/mineria-subterranea-en-que-consiste-y-cuales-son-sus-tipos/>). De dominio público.

Las labores mineras subterráneas se caracterizan por la construcción de túneles, galerías, pozos y chimeneas como se muestra en la Figura 2, y la elección del método de explotación depende de las características geológicas del yacimiento, como la dureza de la roca y la morfología del mineral. La minería subterránea, a pesar de los riesgos inherentes, ofrece un entorno de trabajo más seguro y controlado gracias a la infraestructura subterránea. Además, su menor impacto visual y ambiental la posiciona como una alternativa más sostenible en comparación con la minería a cielo abierto. El desarrollo sostenible Según Brundtland (1987), “Es el desarrollo que satisface las necesidades actuales de las personas sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas”.

La minería a cielo abierto presenta costos de operación menores debido al empleo de maquinaria de gran envergadura y a la eliminación de gastos asociados a la ventilación y el sostenimiento. “Las minas a cielo abierto o minas a tajo abierto, son aquellas cuyo proceso extractivo se realiza en la superficie del terreno usando generalmente maquinarias de gran tamaño” (Luna, 2011, p. 29). Además, permite una mayor recuperación de los recursos minerales. Sin embargo, requiere de extensas áreas de terreno y genera un impacto ambiental significativo.

Por su parte, la minería subterránea, aunque presenta mayores costos de operación, es menos invasiva y genera un menor impacto visual. Ambas modalidades mineras requieren de medidas de mitigación ambiental y de gestión de riesgos para garantizar la sostenibilidad y la seguridad de las operaciones. Según Luna (2011):

Tanto en la minería a cielo abierto como en la subterránea después de las actividades de exploración explotación y beneficios es necesario tratar de recuperar el paisaje natural y ejercer las actividades mineras en un marco de respeto al ambiente y de seguridad e higiene minera a fin de evitar conflictos sociales cuidar la salud de los trabajadores y garantizar el desarrollo sostenible de la actividad minera. (p. 49)

Estos resultados sugieren que, a pesar de la explotación minera, existe la posibilidad de restaurar los paisajes afectados que es el 1.42% de territorio de actividad minera tal como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Porcentaje de Territorio de las Actividades Mineras en el Perú

14.63% TERRITORIO CONCESIONADO A LA MINERÍA *
18'805,304 ha

1.42% TERRITORIO EN ACTIVIDAD MINERA
1'827,785 ha

678	UNIDADES EN PRODUCCIÓN	1'502,041 ha	1.17%
311	UNIDADES EN EXPLORACIÓN	325,744 ha	0.25%

40.68% ÁREAS RESTRINGIDAS A LA ACTIVIDAD MINERA
52'275,005 ha

TIPO	CANTIDAD	ha	% DEL PERÚ	
1	ÁREA NATURAL - USO INDIRECTO	28	10,729,113	8.348
2	CLASIFICACIÓN DIVERSA (gasoductos, oleoductos, otros)	19	8,382,120	6.530
3	SITIO RAMSAR (humedales de importancia internacional)	14	6,951,689	5.410
4	ECOSISTEMAS FRÁGILES	187	5,082,243	3.963
5	PROYECTO ESPECIAL - HIDRÁULICOS	11	3,450,751	2.665
6	ÁREA DE DEFENSA NACIONAL	61	3,428,069	2.668
7	RESERVA INDÍGENA	5	2,829,724	2.202
8	CONCESIÓN FORESTAL CON FINES MADERABLES	539	2,280,484	1.765
9	ZONA ARQUEOLÓGICA	9,851	1,792,423	1.395
10	RESERVA TERRITORIAL	2	1,324,283	1.031
11	ÁREA DE NO ADMISIÓN DE PETITORIOS	206	473,013	0.368
12	ÁREA DE NO ADMISIÓN DE PETITORIOS INGENMET	44	369,300	0.285
13	ZONA URBANA	8	109,812	0.085
14	PUERTO Y/O AEROPUERTO	53	105,442	0.084
15	RED VIAL NACIONAL	145	19,358	0.015
16	PASAJE CULTURAL	3	16,729	0.008
17	SITIO HISTÓRICO DE BATALLA	2	5,165	0.004
18	ZONA DE RIESGO NO MITIGABLE	40	1,812	0.001

Nota. Esta figura muestra las áreas en hectáreas que están destinados a la explotación minera en el Perú. Adaptado de Boletín estadístico minero 12-2022, Ministerio de Energía y Minas. Lima, enero 2023. (https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3447306/2023_%20MAPA%20DE%20PRODUCCION.pdf?v=1683907451). De dominio público.

Según Luna (2011), “En la actualidad tenemos el reto de desarrollar la actividad minera y energética dentro de un marco de respeto al ambiente y promoviendo el desarrollo sostenible” (p. 2). En este contexto, las actividades mineras deben adoptar una responsabilidad integral, abarcando aspectos ambientales, sociales y económicos. Esto implica minimizar el impacto negativo en ecosistemas, garantizar condiciones laborales justas y seguras, así como contribuir al desarrollo sostenible de las comunidades locales.

2.2.1.1 Ciclo de Minado Subterráneo

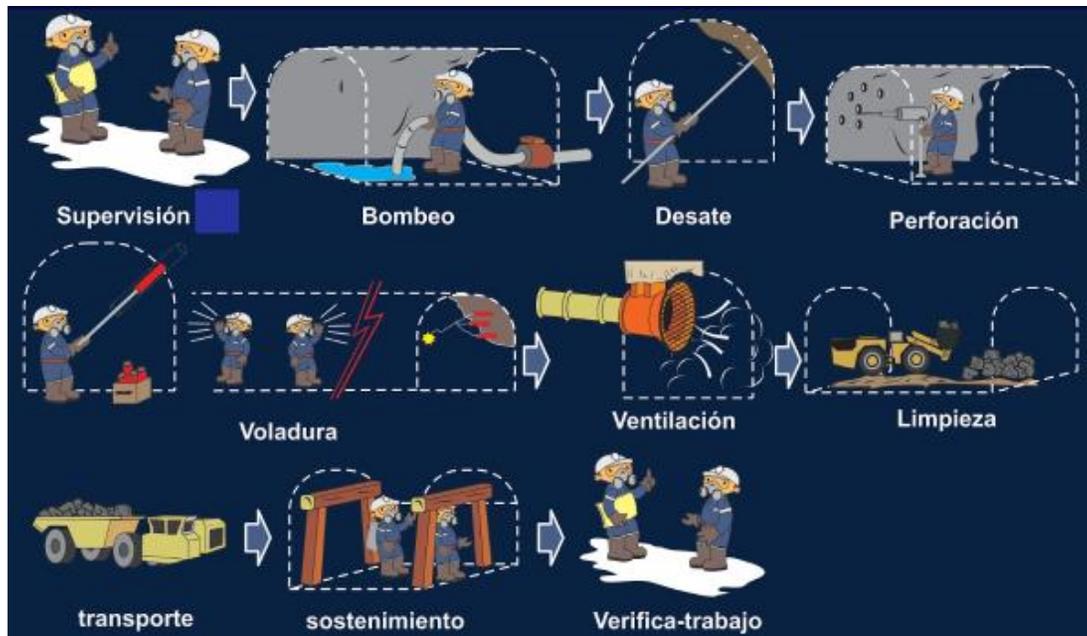
El ciclo de avance en la minería subterránea se compone de una secuencia de diez operaciones interrelacionadas tal como se muestra en la Figura 4:

- *Supervisión:* Se revisa las condiciones y el estado del frente de trabajo para su posterior etapa de trabajo.
- *Bombeo:* En caso de que la labor se encuentre inundado por el constante goteo, se procede a bombear el área.
- *Desate:* Verificar el tipo de roca para su posterior desate manual en caso sea puntual, caso contrario utilizar un equipo scaler.
- *Perforación:* Creación de taladros en la roca según planos topográficos para la colocación de explosivos.
- *Voladura:* Fragmentación de la roca mediante la detonación de explosivos para la extracción de mineral.
- *Ventilación:* Eliminación de gases, polvo y/o partículas generadas por la voladura.
- *Limpieza:* Remoción de material suelto para garantizar la seguridad del personal.
- *Acarreo:* Transporte del mineral extraído hacia las zonas de almacenamiento o procesamiento.
- *Sostenimiento:* Instalación de soportes para garantizar la estabilidad de las excavaciones.
- *Replanteo:* Definición de la nueva zona de trabajo para iniciar un nuevo ciclo.

La perforación, como primera etapa, condiciona la eficiencia de las operaciones posteriores, ya que una perforación adecuada garantiza una fragmentación óptima del material y facilita las labores de carga y acarreo.

Figura 4

Ciclo de Minado en una Minería Subterránea



Nota. Cada uno de las etapas de un ciclo de minados es importante para la extracción de mineral, caso contrario hay una gran probabilidad de que ocurra un accidente. Adaptado de Prezi, por Martin Oscar Gustavo, 2023 (https://prezi.com/p/gbh_rfqzii1h/ciclo-de-minado-subterráneo/). De dominio público.

La perforación minera subterránea en el Perú se realiza tradicionalmente mediante equipos operados de manera manual desde cabinas o en caso contrario fuera de la cabina, exponiendo a los operadores y ayudantes a diversos riesgos inherentes a las labores subterráneas. A pesar de su importancia en el ciclo minero, esta metodología presenta limitaciones en términos de precisión, eficiencia y seguridad.

A nivel mundial, la mayor parte de la extracción minera subterránea se basa en la combinación de perforación y voladura. Sin embargo, en el contexto peruano, la ausencia de sistemas de perforación automatizados revela una dependencia significativa de métodos manuales. Esta situación plantea la necesidad de explorar tecnologías más avanzadas que permitan mejorar la seguridad de los trabajadores y optimizar los procesos productivos.

2.2.2 Estado de Tecnología Actual

La revolución tecnológica de las últimas décadas ha impulsado la miniaturización de dispositivos electrónicos y sensores, permitiendo la integración de sistemas cada vez más complejos en espacios reducidos como por ejemplo en el jumbo DL421 de Sandvik (Figura 5).

Se realizará un análisis exhaustivo de las diferentes tecnologías de perforación automatizada disponibles en el mercado global para operaciones subterráneas. Se evaluará su grado de autonomía, características técnicas y capacidad para adaptarse a diversos escenarios mineros.

Figura 5

Sistema de Control por Red (RCS) del Equipo Jumbo DL421 de Sandvik



Nota. Este sistema te permite controlar de manera precisa los sistemas del equipo jumbo y hasta podría implementarse nuevas funciones como la teleoperación. Adaptado de Sandvik, por Sandvik AB, 2024 (<https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/equipo/equipo-de-perforacion-subterranea/dl421/>). De dominio público.

Según Herrera y human (2022), “Tres pilares respaldan la solución autónoma incorporada en el proyecto emprendido por Ferreyros para Anglo American en Quellaveco: la tecnología, la definición y optimización de procesos, así como la gestión de las personas”.

2.2.2.1 Epiroc Simba S7

El Simba S7, un equipo de perforación de última generación, presenta un diseño innovador que comparte múltiples componentes con el reconocido Boomer S1. Especializado en galerías de dimensiones moderadas, este equipo destaca por su capacidad para perforar barrenos largos en diversas configuraciones, incluyendo barrenos paralelos ascendentes y descendentes. Su martillo en cabeza de alto rendimiento, combinado con una unidad de perforación montada en un brazo articulado, garantiza una perforación precisa y eficiente.

La serie Simba S7 (Figura 6) ha sido diseñada con un objetivo claro: optimizar la productividad en la perforación de túneles. Su robusta construcción, combinada con un alto nivel de automatización y una serie de características de seguridad, garantiza un rendimiento excepcional en espacios de trabajo reducidos. Gracias a su tamaño compacto y su gran maniobrabilidad, la serie S es ideal para operaciones en túneles de dimensiones pequeñas a medianas.

Figura 6

Equipo Epiroc de Taladros Largos Simba S7



Nota. Los equipos Epiroc tienen diferentes versiones por las principales características el tipo de bomba principal y motor eléctrico entre otros. Adaptado de Epiroc, por Epiroc Perú S.A., 2024 (<https://www.epiroc.com/es-pe/products/drill-rigs/production-drill-rigs/simba-s7>). De dominio público.

La implementación de medidas de seguridad avanzadas, como la parada automática del equipo y el control remoto, contribuye significativamente a mejorar las condiciones laborales en las operaciones de perforación. Al reducir el riesgo de accidentes y mejorar el entorno de trabajo, estas medidas no solo protegen al personal, sino que también optimizan la eficiencia operativa al minimizar los tiempos de parada no programados.

Epiroc se ha posicionado como un referente en el sector de la automatización, acumulando más de dos décadas de experiencia en el desarrollo y perfeccionamiento de soluciones innovadoras. Gracias a una estrecha colaboración con clientes y socios, Epiroc ha logrado implementar con éxito más de 3.000 plataformas equipadas con su sistema RCS (Figura 7), mejorando significativamente la precisión y eficiencia en las operaciones mineras y de construcción de túneles a nivel mundial.

Figura 7

Monitor del RCS5 del Simba ME7C



Nota. El sistema de control por red 5 o RCS5 está implementado en la mayoría de los equipos de la marca Epiroc. Adaptado de YouTube, por Marcelo Godoy, 2021 (<https://www.youtube.com/watch?v=FzSUyfZmDBQ>). De dominio público.

La capacidad de actualización continua del Simba S7 permite adaptar la máquina a las necesidades cambiantes de la operación. Esta flexibilidad facilita la incorporación de nuevas funciones y optimizaciones, mejorando así la productividad general. La posibilidad de operar la máquina durante los cambios de turno y descansos maximiza el tiempo de funcionamiento y aumenta la eficiencia.

Según Mining & Construction (2022), “Monitoreo de maquinaria en tiempo real, generación continua de informes y aumento de la productividad. Pronto será la realidad en Boliden Aitik, en la región más septentrional de Suecia, gracias a Mobius for Drills, la nueva plata forma de Epiroc con tecnología de IA” (p. 15). Epiroc, gracias a su compromiso con la investigación y el desarrollo, se posiciona como un referente en la innovación tecnológica aplicada a la maquinaria. La empresa ha demostrado una capacidad única para anticiparse a las necesidades del mercado y desarrollar soluciones pioneras en áreas como la automatización, la electrificación y la digitalización. Esta trayectoria la convierte en un actor clave para definir el futuro de la industria, ofreciendo equipos cada vez más eficientes, sostenibles y adaptados a los desafíos para futuras generaciones.

2.2.2.2 Sandvik DL422iE

Sandvik continúa liderando la industria minera con el lanzamiento del DL422iE, un nuevo jumbo subterráneo eléctrico que se suma a su oferta de equipos de batería. Diseñado para operaciones a gran escala en túneles de 4x4 metros o más, este equipo incorpora las últimas tecnologías de automatización y teleoperación, permitiendo una perforación continua y eficiente, incluso durante los cambios de turno. Al eliminar las emisiones y optimizar la recolección de datos, el DL422iE contribuye a una minería más sostenible y productiva.

El Sandvik DL422iE es capaz de perforar una amplia variedad de configuraciones, desde abanicos verticales e inclinados hasta barrenos largos simples o paralelos de hasta 54 metros de profundidad. Equipado con el potente martillo HF1560ST, optimizado para tubos ST68, este equipo garantiza una perforación eficiente y precisa. Gracias a su

diseño, el DL422iE (Figura 8) reduce el desgaste de las herramientas de perforación y prolonga su vida útil, lo que se traduce en menores costos de operación.

Figura 8

Equipo Sandvik de Taladros Largos Sandvik DL422iE



Nota. Adaptado de Sandvik, por Sandvik AB, 2024 (<https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/equipo/equipo-de-perforaci%C3%B3n-subterr%C3%A1neo/dl422ie/>). De dominio público.

El Sandvik DL422iE viene equipado de serie con el paquete de automatización Platinum, que, junto con el sistema de control i-Class, permite una perforación automatizada y continua, maximizando la productividad y la precisión en barrenos largos y abanicos. Esta configuración, combinada con el cargador de barrenos automático opcional, facilita la perforación autónoma de abanicos completos, incluso durante los cambios de turno. Además, la integración con los sistemas AutoMine® y OptiMine® permite un control remoto de múltiples unidades y una optimización de las operaciones mineras.

En línea con la creciente demanda de soluciones sostenibles, el Sandvik DL422iE ofrece un rendimiento de perforación excepcional al tiempo que reduce significativamente las emisiones. Equipado con un sistema de propulsión eléctrica, este equipo elimina la necesidad de combustibles fósiles y disminuye los costos operativos. Además, su capacidad de carga durante la perforación y su conexión a la red eléctrica de la mina optimizan aún más su eficiencia.

Figura 9

Sistema de Baterías de Sanvik



Nota. Adaptado de International Mining, por Daniel Gleeson, 2022 (<https://im-mining.com/2022/09/13/sandvik-setting-the-battery-system-safety-standard-in-underground-mining/>). De dominio público.

El Sandvik DL422iE cuenta con un brazo telescópico ZR35 de gran alcance y estabilidad, lo que permite una perforación precisa y versátil en una amplia gama de configuraciones y su sistema de baterías (Figura 9) que lo hace más amigable con el ambiente. Su diseño, con un amplio desplazamiento y una gran inclinación, facilita la perforación en abanico en secciones transversales de gran tamaño. El sistema de paralelismo electrónico garantiza una alineación precisa de los barrenos, mientras que el soporte de brazo extendido opcional aumenta la versatilidad en aplicaciones de perforación desafiantes.

2.2.2.3 Resemin Mukki LHBP

El jumbo MUKI LHBP 2R (Figura 10) es un equipo de perforación electrohidráulico diseñado para taladros largos, que destaca por su precisión y versatilidad. Su brazo hidráulico, equipado con paralelismo automático y dos unidades de rotación, permite perforar cerca de las paredes de la mina, mientras que su viga serie 8000 garantiza una estabilidad excepcional. La perforadora Montabert HC 50, con su sistema de martilleo inverso, ofrece un alto rendimiento y confiabilidad.

Figura 10

Equipo Resemin de Taladros Largos Muki LHBP 2R



Nota. Adaptado de Resemin, por Resemin S.A., 2024 (https://www.resemin.com/index.php?route=product/product&path=69_59&product_id=56). De dominio público.

El sistema AMLH (Figura 11) es una herramienta tecnológica avanzada que optimiza el proceso de perforación de taladros largos. Este sistema, mediante sensores y software especializados, permite medir con precisión ángulos de rotación, inclinación y paralelismo de la viga, además de controlar de forma electrónica el carrusel de barras y visualizar la cantidad de barras utilizadas. Gracias a estas funciones, se logra una mayor precisión y eficiencia en las operaciones de perforación.

Hace más de 20 años logramos nuestra internacionalización, exportando por primera vez un equipo de taladros largos a Zambia. Esto definitivamente fue un impulso para llegar a más países, cuando el mercado era solo liderado por países europeos. Estamos felices y expectantes por lo que podemos seguir logrando. (Valenzuela, 2024, p. 1)

Esto indica que los equipos fabricados en Resemin presentan una alta confiabilidad y disponibilidad, lo cual los convierte en una opción idónea para las exigentes condiciones de trabajo en minas subterráneas.

Figura 11

Sistema AMLH (Angle Measurement Long Hole) de Muki LHBP 2R



Nota. Es un sistema de ayuda electrónica en los equipos de taladros largos que ayuda a medir los ángulos de rotación, inclinación y paralelismo de la viga. Adaptado de Resemin, por Resemin S.A., 2024 (https://www.resemin.com/index.php?route=product/product&path=69&product_id=56). De dominio público.

2.2.2.4 KLEF Little Hammer

Es un equipo de perforación jumbo electrohidráulico, diseñado para taladros de gran longitud, incorpora un brazo telescópico modelo ET5 con un sistema de rotación de doble acción. Este sistema, junto con la viga equipada con dos estabilizadores (Stingers), garantiza una perforación precisa y estable. El equipo está equipado con una perforadora COP 1238 o COP 1838. El chasis articulado, de alta resistencia, y el motor diésel aseguran una movilidad y potencia óptimas para trabajos pesados.

Figura 12

Equipo KLEF de Taladros Largos Little Hammer



Nota. Adaptado de KLEF, por KLEF Sistema Electro Hidráulicos E.I.R.L., 2022 (<https://www.klefmineria.com/little-hammer-tl/>). De dominio público.

Este equipo (Figura 12) cuenta con un sistema de control directo (DCS), es decir cuenta con palancas o joystick para su accionamiento de sus actuadores. Este equipo está diseñado para labores de sostenimiento en excavaciones subterráneas de dimensiones variables (3.5m x 3.5m a 5.0m x 5.0m), presenta una configuración versátil. Cuenta con un doble sistema de vigas: una destinada a la perforación y otra para la instalación de diversos elementos de sostenimiento, tales como Split Set, Swellex, pernos helicoidales y hidrabolt, adaptándose a las necesidades específicas de cada proyecto. Su chasis articulado, de alta resistencia, y su propulsión diésel con transmisión hidrodinámica lo convierten en una máquina robusta y maniobrable para trabajos en entornos subterráneos exigentes.

A pesar de su diseño aparentemente sencillo, este equipo ha demostrado una capacidad excepcional para adaptarse a las condiciones adversas de la minería subterránea. Su robustez, combinada con su eficiencia, lo convierten en una herramienta invaluable para tareas que requieren resistencia. Los resultados obtenidos en nuestras pruebas indican que este equipo supera las expectativas, posicionándose como una opción confiable y rentable para las operaciones mineras subterráneas.

2.2.2.5 Comparación de las Tecnologías Actuales

A continuación, se presenta una tabla comparativa que detalla las especificaciones técnicas de los equipos previamente analizados.

Tabla 1

Comparación de Características Técnicas de los Equipos de Taladros Largos

FABRICANTE	EPIROC	SANDVIK	RESEMIN	KLEF
MODELO	Simba S7	DL422iE	Muki LHBP	Little Hammer
POTENCIA	80kW	135kW	55kW	55kW
LONGITUD DE VIGA	3160 mm	3500 mm	2797 mm	2605 mm
DIÁMETRO DE PERFORACIÓN	51-64 mm	39-64 mm	45-76 mm	45-64 mm
PESO	13500 kg	33000kg	9800 kg	10200 kg

Nota. La Tabla 1 muestra las principales características técnicas de los equipos más reconocidos en el Perú de taladros largos 2024. Fuente: Elaboración propia (2024).

La selección adecuada de la potencia, la longitud de la viga y el diámetro de perforación resulta fundamental para optimizar el proceso de perforación de taladros largos en labores mineras subterráneas. Estos parámetros influyen directamente en la velocidad de penetración, la calidad de la perforación y la vida útil de las herramientas de corte. Una configuración inadecuada de estos factores puede generar una disminución en la productividad, un aumento en los costos de operación y una mayor probabilidad de fallas en el equipo.

Aunque los sistemas eléctricos no son los componentes más visibles durante el proceso de perforación, su papel es fundamental para garantizar la precisión y eficiencia de la operación. La fase de preparación del equipo, que involucra el movimiento y posicionamiento de los componentes, depende en gran medida de la energía eléctrica. Un sistema eléctrico confiable y eficiente permite un posicionamiento preciso del equipo de perforación, lo que se traduce en una mayor calidad y productividad en la ejecución de los taladros largos.

Tabla 2*Comparación de Características del Sistema de los Equipos de Taladros Largos*

FABRICANTE	EPIROC	SANDVIK	RESEMIN	KLEF
SISTEMA DE CONTROL	RCS - DCS	I Class - SICA	DCS	DCS
CONTROL DE PARÁMETROS	✓	✓	✓	
MONITOREO DE CONDICIONES	✓	✓		
TIPO DE CONTROL	Autónomo Remoto	Autónomo Remoto	Autónomo	Autónomo

Nota. La tabla muestra las principales características del sistema de los equipos de taladros largos en minería subterránea del Perú 2024. Fuente: Elaboración propia (2024).

Los equipos analizados en la Tabla 2 presentan divergencias significativas en términos de sistemas de control y control de parámetros. El modelo de Epiroc se destaca por su sofisticación tecnológica, ofreciendo un mayor nivel de automatización. Sin embargo, su peso y costo elevado lo posicionan en un segmento de mercado específico. Por su parte, Sandvik propone un enfoque basado en teleoperación, mientras que Resemin se orienta a aplicaciones mineras de menor escala, donde la relación costo-beneficio y las dimensiones del equipo son factores determinantes en la selección.

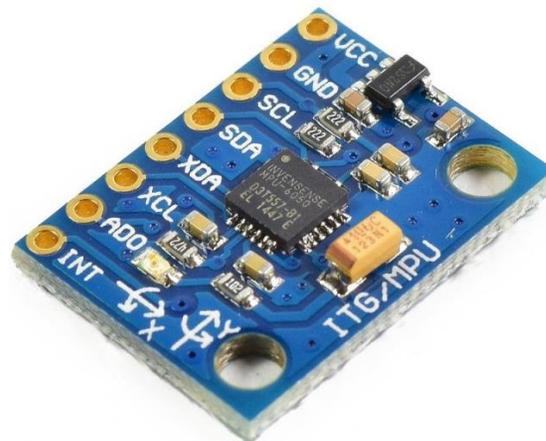
En el contexto de un mercado minero peruano cada vez más competitivo, KLEF ha adoptado una estrategia de posicionamiento basada en la oferta de equipos mineros de bajo costo y fácil operación. Esta estrategia busca atraer a pequeñas y medianas empresas mineras, así como a cooperativas, que requieren soluciones adaptadas a sus necesidades y capacidades financieras. No obstante, esta estrategia está generando una desventaja competitiva, ya que la tendencia actual del mercado favorece cada vez más a equipos con un alto grado de sofisticación tecnológica.

2.2.3 Sensor MPU6050

La MPU6050 (Figura 13) es un sistema microelectromecánico (MEMS) que combina un acelerómetro de tres ejes y un giroscopio de tres ejes en un único chip. El acelerómetro mide la aceleración lineal del dispositivo, incluyendo la aceleración debida a la gravedad, mientras que el giroscopio mide la velocidad angular de rotación alrededor de cada uno de los tres ejes ortogonales. La combinación de estos dos sensores permite determinar la orientación y el movimiento del dispositivo en el espacio tridimensional.

Figura 13

Sensor MPU6050



Nota. El módulo emplea el protocolo I2C para comunicarse, lo cual lo hace compatible con una amplia gama de microcontroladores. Recuperado de https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html. Copyright (2023) por Naylamp Mechatronics.

EL MPU6050 es una unidad de medición inercial o IMU (Inertial Measurement Units) de 6 grados de libertad (DoF) pues combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes. Este sensor es muy utilizado en navegación, goniometría, estabilización, etc. (Naylamp, 2023, p. 1)

Estos resultados sugieren que el sensor ha sido diseñado específicamente para operar en entornos de alta presión como para aviones no tripulados, requiriendo una configuración precisa para la adquisición de datos.

2.2.3.1 Características Técnicas

La MPU6050 destaca por su bajo consumo energético, alta resolución y amplio rango de medición. Además, cuenta con una interfaz de comunicación I2C que facilita su integración en diferentes plataformas. Entre sus principales características técnicas se encuentran:

- *Rango de medición:* Variable para el acelerómetro y el giroscopio, permitiendo adaptarse a diferentes aplicaciones.
- *Tasa de muestreo:* Configurable para ajustar la frecuencia de adquisición de datos.
- *Bajo ruido:* Permite obtener mediciones precisas incluso en entornos con vibraciones.
- *Compensación de temperatura:* Reduce los errores causados por variaciones en la temperatura ambiente.

2.2.3.2 Aplicaciones

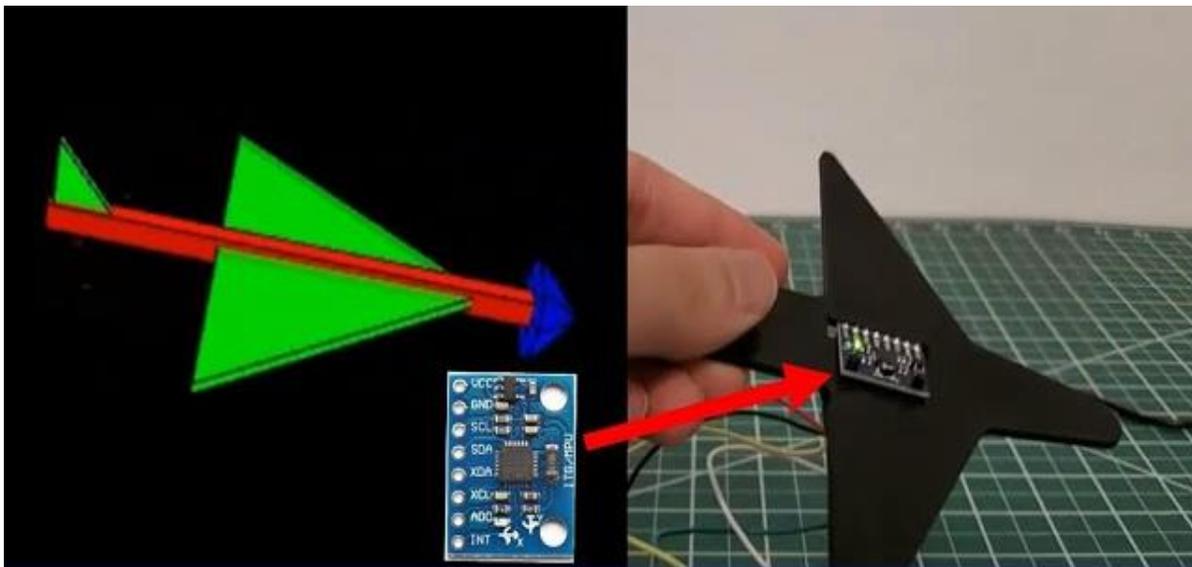
La versatilidad de la MPU6050 la convierte en una herramienta invaluable en diversas aplicaciones:

- *Robótica:* En robots móviles, drones y brazos robóticos, la MPU6050 se utiliza para estimar la posición y orientación, lo que es fundamental para la navegación autónoma y el control de movimiento.
- *Aeronáutica:* En sistemas de control de vuelo de drones y aviones no tripulados, la MPU6050 proporciona datos precisos sobre la actitud y la velocidad angular, permitiendo estabilizar el vuelo y realizar maniobras complejas.
- *Dispositivos móviles:* En smartphones, tablets y wearables, la MPU6050 se utiliza para detectar el movimiento del dispositivo, habilitar funciones como el control por gestos y mejorar la experiencia del usuario.

- *Realidad virtual:* En sistemas de realidad virtual, la MPU6050 se emplea para rastrear la posición y orientación de la cabeza del usuario, creando una experiencia más inmersiva.
- *Sistemas de estabilización:* En cámaras, telescopios y otros equipos ópticos, la MPU6050 se utiliza para compensar los movimientos involuntarios del operador y mejorar la estabilidad de la imagen.

Figura 14

Sensor MPU6050 Aplicado en la Aeronáutica



Nota. El sensor MPU6050 mide el ángulo de inclinación de un avión no tripulado para su estabilidad en el aire. Recuperado de <https://oxeltech.de/en/select-the-right-position-tracking-technology-key-considerations-and-comparisons/>. Copyright (2024) por Oxeltech.

La MPU6050 ha demostrado ser una IMU de bajo costo y alto rendimiento, capaz de satisfacer las demandas de una amplia gama de aplicaciones (Figura 14). Su pequeño tamaño (20mm x 15mm), bajo consumo energético y facilidad de uso la convierten en una elección popular para desarrolladores y fabricantes de dispositivos electrónicos. A medida que la tecnología continúa avanzando, se espera que la MPU6050 y otros sensores similares desempeñen un papel cada vez más importante en la creación de sistemas inteligentes y autónomos.

Comparación con otros IMU: Ventajas y desventajas de la MPU6050 frente a otros sensores similares.

- *Calibración y compensación de errores:* Técnicas para mejorar la precisión de las mediciones.
- *Fusión de datos:* Combinación de los datos de la MPU6050 con otros sensores para obtener estimaciones más precisas de la posición y orientación.
- *Aplicaciones avanzadas:* Uso de la MPU6050 en sistemas de navegación inercial, control de equilibrio y reconocimiento de patrones de movimiento.

2.2.4 Arduino uno R3

La placa Arduino Uno R3 (Figura 15), equipada con el microcontrolador ATmega328P, es la plataforma de desarrollo más utilizada para principiantes debido a su sencilla configuración. Cuenta con 14 puertos de entrada/salida digital, de los cuales 6 ofrecen modulación por ancho de pulso (PWM), y 6 entradas analógicas para la adquisición de datos. Su oscilador cerámico de 16 MHz garantiza un funcionamiento estable, mientras que las conexiones USB, de alimentación y el conector ICSP permiten una amplia variedad de configuraciones. La inclusión de un botón de Reset facilita la re inicialización del sistema. Al ser una placa autocontenida, solo requiere una fuente de alimentación para comenzar a operar, en nuestro caso funcionara con una línea de alimentación que viene directo del tablero 440v del equipo donde hay pines de salida de 12v.

2.2.4.1 Características

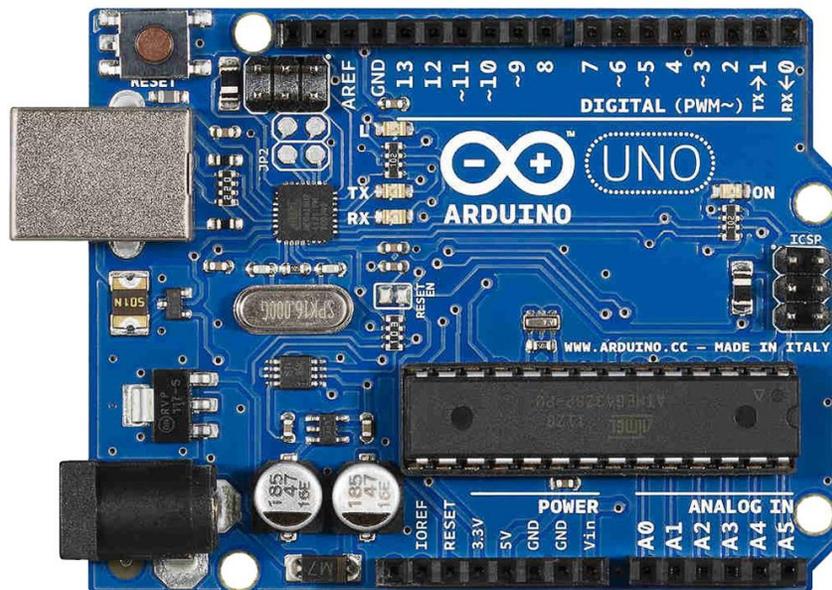
- Microcontrolador: AT328P
- Voltaje de operación: 5V DC
- Pines digitales: 14 (6 salidas PWM)
- Entradas analógicas: 6 (ADC 10-bit)
- Memoria FLASH: 32KB (2KB usados por el Bootloader)

- Memoria SRAM: 2KB
- Memoria EEPROM: 1KB

Naylamp en su página web comenta lo siguiente “Arduino® es la plataforma de desarrollo de proyectos en electrónica y robótica más utilizada a nivel mundial, esto debido a su facilidad de aprendizaje y uso, abundante documentación y múltiples aplicaciones” (Naylamp, 2023, p. 1). Esto indica que esta placa la convierte en una excelente opción para desarrollar proyectos de electrónica y robótica, como el que se propone en este estudio. La placa Arduino Uno R3, en particular, se destaca como una de las más utilizadas y versátiles dentro de esta plataforma.

Figura 15

Arduino Uno R3



Nota. Recuperado de <https://www.markercreativo.com/store/producto/arduino-uno-r3/> .
Copyright (2024) por Marker Store Creativo.

La placa Arduino UNO es la elección ideal para quienes se inician en el mundo de la electrónica y la programación. Su diseño intuitivo y la extensa documentación disponible la convierten en la plataforma más accesible para realizar proyectos electrónicos. Gracias a su amplia comunidad de usuarios, encontrar soporte y ejemplos es sencillo, lo que facilita el aprendizaje.

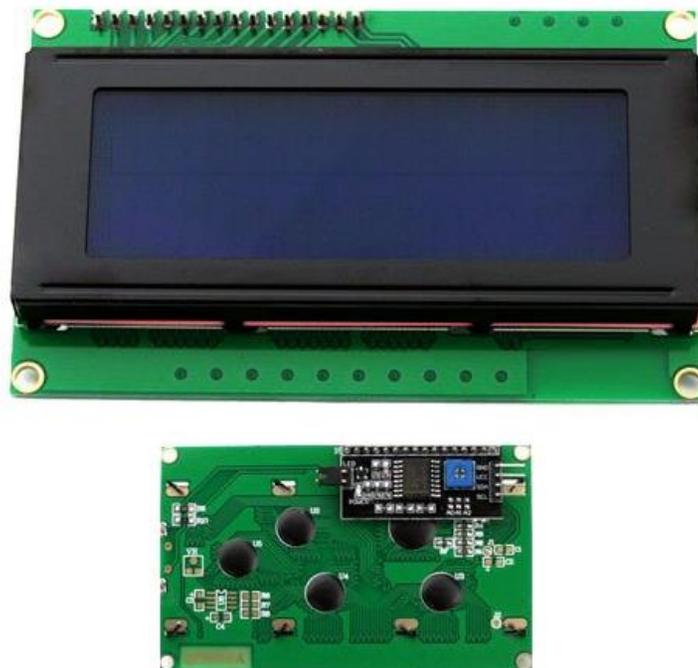
2.2.5 Pantalla LCD 4x20 con I2C

Las pantallas LCD 20x4 con interfaz I2C, caracterizadas por su fondo bicolor, son componentes electrónicos indispensables en diversos proyectos. Su capacidad para mostrar texto, números y gráficos las convierte en una herramienta versátil para crear interfaces intuitivas entre usuarios y dispositivos. Compatible con una amplia gama de plataformas de desarrollo, desde Arduino hasta Raspberry Pi, estas pantallas simplifican la visualización y control de información en aplicaciones electrónicas.

Esta pantalla LCD monocromática (Figura 16) opera con una alimentación de 5 voltios DC y consume una corriente máxima de 125 miliamperios. Utiliza el chip PCF8574 como interfaz I2C, lo que permite una comunicación sencilla con diferentes microcontroladores. El controlador HD44780 es el encargado de gestionar la visualización de los caracteres en la pantalla, que cuenta con un fondo azul y texto blanco. Además, incluye un potenciómetro para ajustar el brillo de la retroiluminación.

Figura 16

Pantalla LCD 4x20 con I2C



Nota. Recuperado de <https://mecatronica.saisac.pe/producto/pantalla-lcd-20-x-4-con-i2c/> . Copyright (2024) por Saisac Mecatrónica.

2.3 Definición de Términos Básicos

Acelerómetro

Un acelerómetro es un sensor que mide la aceleración lineal de un objeto. Esta aceleración puede ser debida a fuerzas externas (como la gravedad) o a cambios en la velocidad del objeto. En el contexto de la MPU6050, el acelerómetro proporciona información sobre la orientación del dispositivo en relación a la gravedad.

Actuadores

Un actuador es un dispositivo que impulsa el movimiento en una máquina. Convierte diversos tipos de energía, como la eléctrica o hidráulica, en fuerza mecánica para realizar tareas específicas.

Barrenos

El barreno es un instrumento rotativo provisto de un elemento helicoidal que permite la perforación de materiales sólidos, generando cavidades cilíndricas.

Calibración

La calibración es el proceso de ajustar un instrumento de medida para que sus resultados coincidan con los de un patrón de referencia. En otras palabras, es como verificar la exactitud de una regla comparándola con una regla maestra.

Efecto Coriolis

El efecto Coriolis también induce una aceleración aparente en un objeto que se desplaza radialmente sobre un disco rotativo, ya sea hacia el centro o hacia la periferia. Análogamente, en una esfera rotante como la Tierra, los objetos en movimiento a lo largo de los meridianos experimentan una desviación debido a la variación de su distancia al eje de rotación.

El sistema de control i-Class

El sistema de control i-Class facilita la implementación de soluciones de minería automatizada y remota, integrando a la perfección con las plataformas My Sandvik y AutoMine®.

Equipos jumbo

son Equipos de perforación frontal que funcionan con hidráulica y fueron diseñados para aplicaciones mineras y de construcción de túneles.

Giroscopio

Un giroscopio es un sensor que mide la velocidad angular de rotación de un objeto alrededor de un eje. En la MPU6050, el giroscopio mide la velocidad de rotación del dispositivo en torno a los tres ejes espaciales, lo que permite determinar la orientación del dispositivo en el tiempo.

Grados de libertad (DOF)

Los DOF representan el número de variables independientes necesarias para describir completamente la posición y orientación de un objeto en el espacio. En el caso de la MPU6050, los 6 DOF corresponden a las tres componentes de la aceleración lineal y las tres componentes de la velocidad angular.

Hydrabolt

El Hydrabolt es un sistema de anclaje mecánico que, mediante la expansión hidráulica, genera una alta fuerza de adhesión, ideal para aplicaciones de carga axial. Es un elemento tubular hueco, se infla con agua a alta presión una vez insertado en el taladro, expandiéndose para conformarse a la geometría del mismo y asegurar una fijación óptima.

I2C

I2C es un protocolo de comunicación serial multimaestro utilizado para conectar dispositivos de baja velocidad. La MPU6050 se comunica con otros dispositivos (como microcontroladores) a través de la interfaz I2C, lo que facilita su integración en sistemas electrónicos.

IPERC

El IPERC es una metodología de gestión de riesgos que implica la identificación sistemática de peligros potenciales, la evaluación de su gravedad y la implementación de medidas de control para mitigarlos en todos los procesos organizacionales.

Lean Six Sigma

Lean Six Sigma es una metodología de mejora continua que, aunque comparte el objetivo de optimizar procesos, se diferencian en su enfoque y herramientas específicas, ofreciendo así perspectivas complementarias para la resolución de problemas organizacionales.

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)

Los MEMS son dispositivos micro fabricados que combinan componentes electrónicos y mecánicos a escala microscópica. Los acelerómetros y giroscopios de la MPU6050 están basados en tecnología MEMS, lo que permite su miniaturización y producción a gran escala.

Split set

Los Split set son sistemas de anclaje provisional, diseñados para reforzar excavaciones mineras y estabilizar taludes en obras superficiales. Fabricados con materiales de alta resistencia, garantizan una mayor durabilidad y capacidad de fijación.

Stingers

Es un brazo hidráulico que llevan los equipos de barrenos largo para que tengan estabilidad al momento de realizar una perforación, la cantidad va a depender de la marca del equipo que consta e 2 a 4 stingers en total del brazo.

Swellex

Swellex es un elemento de anclaje expansible hidráulicamente, ha revolucionado las técnicas de sostenimiento en minería y construcción de túneles gracias a su rápida instalación, alta eficiencia y capacidad de adaptarse a diversas condiciones geológicas.

CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO PROFESIONAL

Este proyecto se inserta en el ámbito de la minería subterránea, específicamente en las operaciones de perforación. La necesidad de implementar un sistema de inclinación en un equipo de perforación de taladros largos Little Hammer surge de la demanda por mejorar la eficiencia y precisión en la ejecución de los patrones de perforación, adaptándose a las complejidades geológicas y a las configuraciones de los frentes de trabajo.

Al momento que el equipo de Little Hammer se realizaba las perforaciones pruebas de taladros en su área de trabajo del equipo Little Hammer donde presentó dificultad en el posicionamiento del brazo según los ángulos de inclinación que pedían en el plano topográfico, en consecuencia, había una deficiente en el angulamiento del brazo y el ayudante se exponía al peligro de caída de objetos pesados o rocas sueltas para poder tener el ángulo deseado con ayuda de un inclinómetro.

Figura 17

Colaborador de la Empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. Realizando Trabajos de Rutina



Nota. Los trabajos rutinarios se inician con la medición de angulamiento del brazo para la iniciación de la perforación. Elaboración propia

3.1 Determinación y Análisis del Problema

La mayoría de los equipos de perforación de taladros largos o barrenos largos cuentan con un sistema de control eléctrico (ECS) o un sistema de control por red (RCS) que les permite tener una buena lectura de parámetros y una nivelación automática, en consecuencia, son más eficientes en el área de trabajo y sin riesgos de caída de rocas al operador y ayudante.

El equipo Little Hammer de la empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. cuenta con un sistema de control directo (DCS), es decir que el control de posicionamiento son 100% hidráulicos, esto hace que el equipo presente dificultades en el posicionamiento y la precisión del brazo durante la perforación a diferentes ángulos. Esto genera ineficiencias en el proceso y exposición a riesgos de caídas de objetos pesados o caída de rocas sueltas.

Figura 18

Equipo Little Hammer Realizando una Perforación en Positivo con un Ángulo de 45° de Inclinación



Nota. Cada perforación que se realiza es según el plano topográfico del área de trabajo que posteriormente fue analizado. Elaboración propia.

La fase de perforación de taladros largos presenta desafíos que impactan en la precisión del proceso. La alineación del brazo de perforación, basada en coordenadas topográficas (Figura 18), es fundamental para garantizar la verticalidad y dirección de los taladros. Sin embargo, factores como vibraciones del equipo, asentamientos del terreno o errores en la medición pueden generar desviaciones que, en algunos casos, pueden llegar hasta los 2 centímetros por cada metro de profundidad. Estas desviaciones pueden afectar la eficiencia de la voladura, aumentar el consumo de explosivos y generar sobre excavaciones, lo que implica mayores costos y riesgos para la operación.

La necesidad de realizar ajustes en el ángulo de inclinación del equipo de perforación, producto de desviaciones iniciales, genera un incremento en el tiempo de ciclo promedio del 15%. Además de impactar en la eficiencia de la operación, estas correcciones pueden generar desalineaciones en los taladros, afectando la calidad del macizo rocoso y aumentando el riesgo de inestabilidades en la excavación. La implementación de sistemas de posicionamiento en tiempo real y el uso de herramientas de control de calidad podrían minimizar estas desviaciones y optimizar el proceso de perforación.

Tabla 3

Parámetros Principales de la Perforación del Equipo Little Hammer

Perforación	Ángulo de Perforación Topográfico	Tiempo de posicionamiento (s)	Desviación de Perforación (mm)
N°1	90°	80	100
N°2	82°	125	250
N°3	60°	110	180
N°4	0°	60	300
N°5	-45°	130	120

Nota. Los tiempos de posicionamiento varían respecto a la rapidez del ayudante y la experiencia del operador. Elaboración propia.

La eficiencia de los sistemas manuales de perforación está directamente ligada a la habilidad y experiencia del operador. La necesidad de posicionar manualmente el brazo en un punto específico y controlar el ángulo de perforación hace más lento el proceso (Tabla 3), lo que puede resultar en tiempos de ciclo más largos y, en ocasiones, llegar a fallar en la explotación del mineral.

La ubicación del ayudante debajo del brazo del equipo lo expone a una serie de peligros, considerando las diversas variables presentes en el proceso.

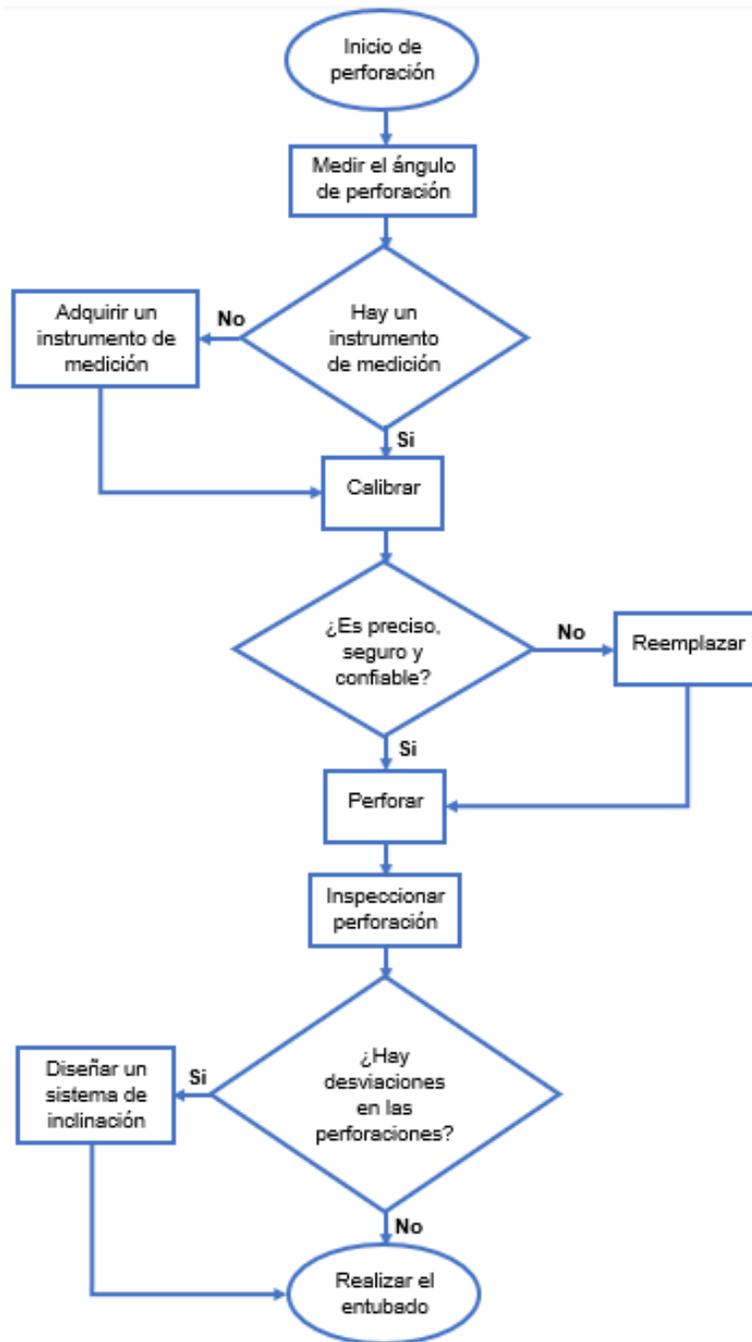
- *Caída de rocas*: Una voladura mal planificada o un sistema de soporte inadecuado pueden provocar la desestabilización del terreno, lo que aumenta significativamente el riesgo de caída de rocas y, por ende, de accidentes fatales para los trabajadores en excavaciones subterráneas.
- *Aire comprimido*: La desconexión repentina de la red de aire comprimido genera una proyección de partículas a alta velocidad, lo que puede impulsar objetos como cañerías, poniendo en riesgo la integridad física del ayudante.
- *Agua*: La acumulación de agua en los sistemas de perforación, producto de la evacuación de detritos, puede generar explosiones repentinas de agua, poniendo en grave riesgo al ayudante.
- *Ruido*: La exposición al ruido sin la protección auditiva adecuada provocará daños auditivos en el ayudante.
- *Vibraciones*: La exposición a estas ondas físicas puede generar molestias inmediatas y, a largo plazo, desencadenar enfermedades crónicas en los trabajadores.

Un accidente durante la operación de una perforadora en una excavación subterránea, además de poner en riesgo la vida del trabajador, genera pérdidas económicas significativas debido a la paralización de la producción por falta de personal calificado y los costos asociados a la atención médica.

Para un análisis más profundo, utilizaremos un diagrama de flujo para el proceso de perforación de taladros largos. Esta herramienta visual nos permitirá Identificar los puntos críticos del proceso.

Figura 19

Diagrama de Flujo del Proceso de Perforación



Nota. El proceso solo hace referencia a la perforación del equipo Little Hammer. Elaboración propia.

Los puntos analizados previamente (Figura 19) con respecto al déficit de precisión del brazo en las perforaciones conducen a los siguientes problemas:

Problema 1

¿Cómo el diseño del sistema de inclinación permitirá mejorar la precisión de los ángulos de inclinación del brazo del equipo de taladros largos Little Hammer?

Problema 2

¿De qué manera la implementación del sistema de inclinación mediante pruebas de campo permitirá evaluar su desempeño en el brazo del equipo de taladros largos Little Hammer?

Problema 3

¿Cómo el análisis de los beneficios obtenidos con la implementación del sistema de inclinación permitirá mejorar la eficiencia, precisión y seguridad en el brazo del equipo de taladros largos Little Hammer?

3.2 Modelo de Solución Propuesto

Con el fin de aumentar la eficiencia en la perforación y evitar futuros accidentes en la perforación taladros largos del equipo Little Hammer. Se ha diseñado, implementado y la evaluado un sistema de inclinación en el equipo de perforación subterránea Little Hammer que permitirá mejorar la precisión y la eficiencia de las operaciones de perforación, reducir los tiempos de ciclo y minimizar los riesgos asociados a la operación manual. Además, esta investigación podría servir como base para el desarrollo de sistemas de control más avanzados en equipos de perforación similares dentro de la empresa KLEF.

Para ello se ha seleccionado una unidad de medida inercial (IMU) MPU6050 con 6 grados de libertad para poder medir el ángulo de inclinación del brazo en los ejes X, Y y Z. Este sensor cuenta con un acelerómetro de tres ejes con lo que podemos medir los componentes X, Y y Z de la aceleración de la gravedad y también cuenta con un giroscopio de tres ejes con los que medimos la velocidad angular usando el efecto Coriolis.

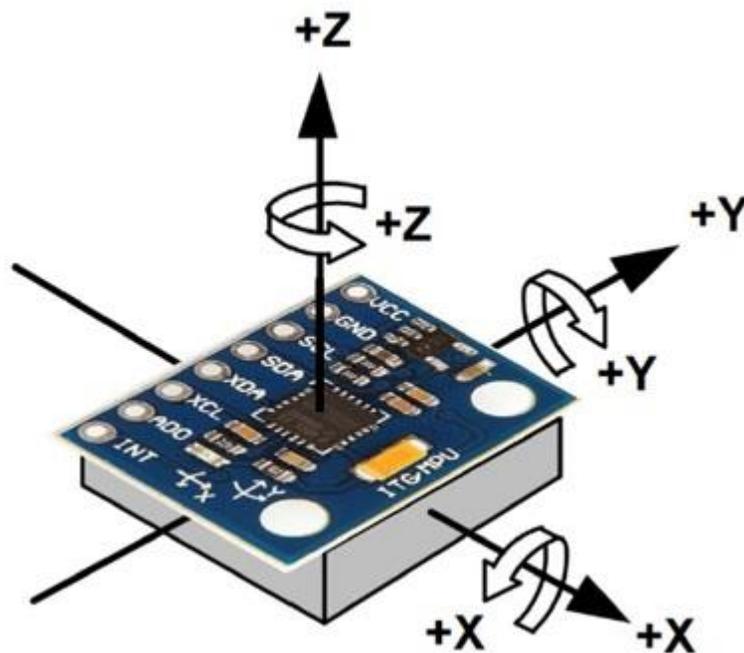
3.2.1 Diseño del Sistema de Inclinación

Para mejorar la precisión de los ángulos de inclinación se realizará un sistema que está conformado con un Arduino uno, un sensor MPU6050, una pantalla LCD 4x20 y un cable apantallado de 4 hilos.

Para su elaboración debemos saber que el sensor MPU6050 incorpora un conjunto de sensores, incluyendo un giroscopio triaxial que permite medir la velocidad de rotación alrededor de tres ejes ortogonales y un acelerómetro triaxial que cuantifica la aceleración en las direcciones X, Y y Z. La orientación espacial de estos ejes (Figura 20), claramente definida en el módulo, resulta fundamental para una correcta interpretación de los datos obtenidos.

Figura 20

Dirección de los Ejes del Sensor MPU6050

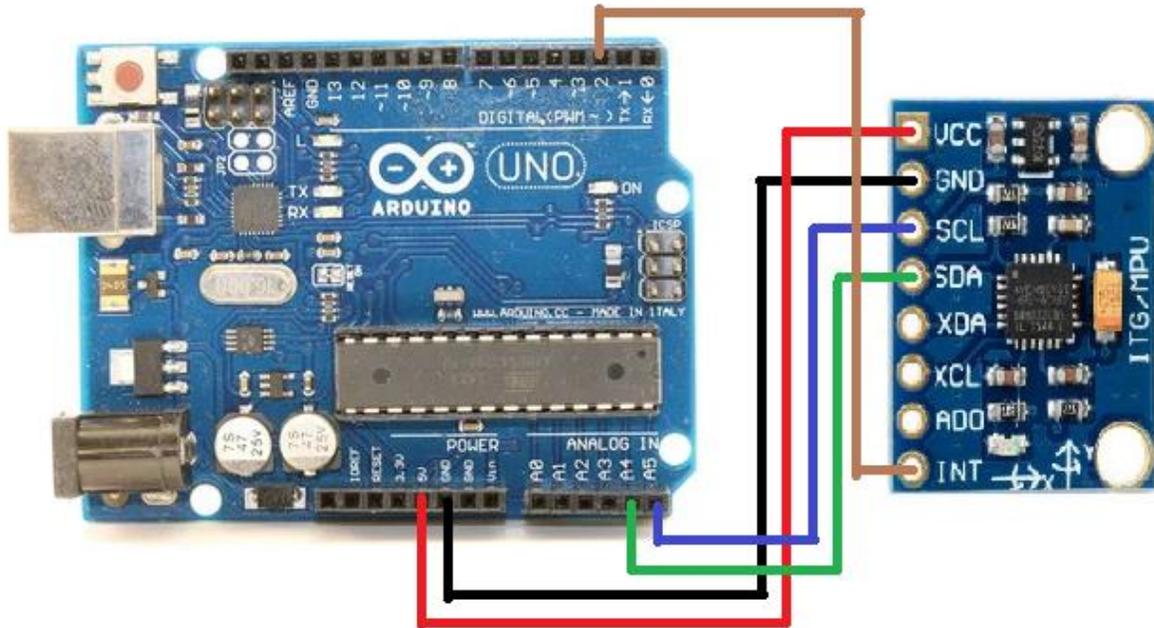


Nota. En la parte superior de sensor MPU6050 se pueden apreciar las direcciones y los ejes. Recuperado de https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html. Copyright (2023) por Naylamp Mechatronics.

Ya teniendo en cuenta los sentidos del sensor MPU6050 y de cuantos grados de libertad tiene para la medición de los ángulos empezamos hacer las conexiones con el Arduino uno tal como se muestra en la figura.

Figura 21

Conexión del Arduino y el Sensor MPU6050



Nota. Los colores de los Jumper (cables) son referenciales debido que no hay un color específico para cada pin. Elaboración propia.

La placa Arduino UNO R3, basada en el microcontrolador ATmega328P, ofrece una plataforma de desarrollo versátil con 14 pines de E/S digitales (6 con capacidad PWM), 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, conexión USB para programación y alimentación, un conector ICSP para programación directa y un botón de reinicio.

La ventaja del sensor MPU6050 es que puede conectarse con hasta 3 tipos de Arduino ya que tienen conexiones de modo i2c estándar, para ello la diferencia estará en la entrada analógica de cada Arduino tal como se muestra en la Figura 21. A continuación, se mostrará un cuadro con el tipo de Arduino y las conexiones que se pueden hacer con el sensor MPU6050.

Tabla 4*Conexión de Sensor MPU6050 con 3 Tipos de Placa Arduino*

MPU6050	Arduino Uno, Nano, Mini	Arduino Mega, DUE	Arduino Leonardo
VCC	5V	5V	5V
GND	GND	GND	GND
SCL	A5	21	3
SDA	A4	20	2
INT	2	2	7

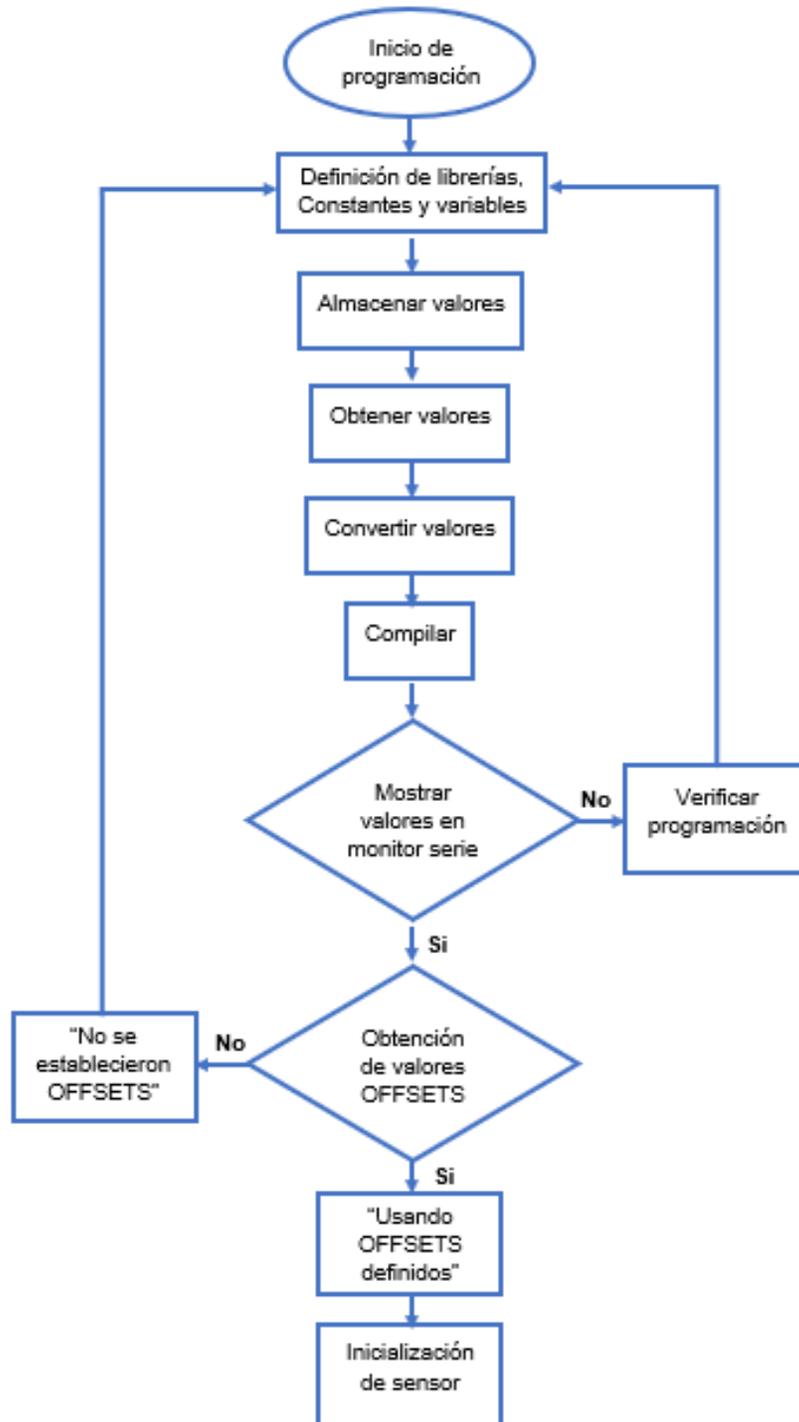
Nota. La única variación es las entradas analógicas. Adaptado de https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscoPIO.html. Copyright (2023) por Naylamp Mechatronics.

Debido a la configuración específica de los pines a conectar (Tabla 4), se optó por emplear un protoboard para facilitar la conexión de componentes. Para garantizar una mayor estabilidad y organización del montaje, se diseñó y fabricó una base personalizada para el Arduino mediante impresión 3D. Esta solución permitió adaptar el soporte físico a las dimensiones exactas del microcontrolador y a las necesidades del prototipo, superando la limitación de no encontrar una base comercial que cumpliera con los requisitos del proyecto.

Dado que la fuerza gravitatoria es la única fuerza externa significativa actuando sobre el acelerómetro, las lecturas obtenidas en cada eje representan directamente los componentes de la aceleración debida a la gravedad. Por consiguiente, la orientación del vector resultante de estas lecturas coincide con la dirección de la gravedad, lo que permite determinar el ángulo de inclinación del sensor respecto a la vertical.

Figura 22

Diagrama de Flujo de la Programación para Obtener el OFFSETS.



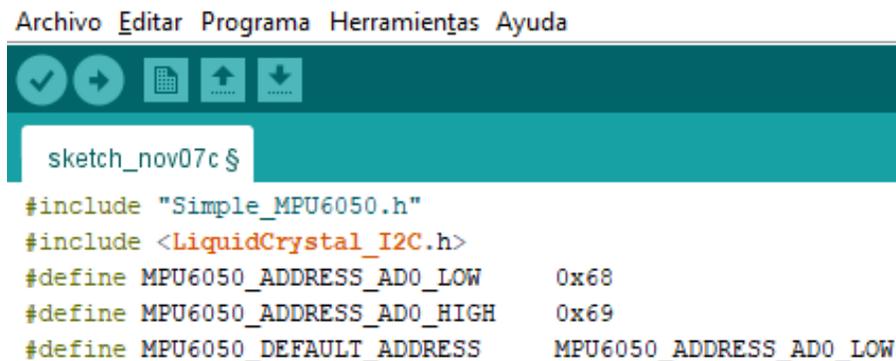
Nota. Este diagrama solo hace referencia hasta obtener el OFFSETS para tener los ángulos de referencia en cero. Elaboración propia.

3.2.1.1 Definición de Librerías, Constantes y Variables

Debido a que el sensor estará sujeto a la aceleración gravitatoria, se requerirá de un conjunto de herramientas de software para su correcto funcionamiento (Figura 23). En primer lugar, se incluirán las librerías "Simple_MPU6050.h" y "<LiquidCrystal_I2C.h>", las cuales proporcionan funciones para la comunicación I2C del sensor MPU6050 y la lectura en la pantalla LCD 4x20 con I2C, respectivamente. A continuación, se definirán las siguientes constantes: "#define MPU6050_ADDRESS_AD0_LOW 0x68" (dirección I2C con AD0 en LOW o sin conexión), "#define MPU6050_ADDRESS_AD0_HIGH 0x69" (dirección I2C con AD0 en HIGH) y "#define MPU6050_DEFAULT_ADDRESS MPU6050_ADDRESS_AD0_LOW" (por defecto AD0 en LOW). Estas constantes permitirán configurar el sensor y ajustar los cálculos realizados en el programa.

Figura 23

Librerías y Contantes para el Sensor MPU6050



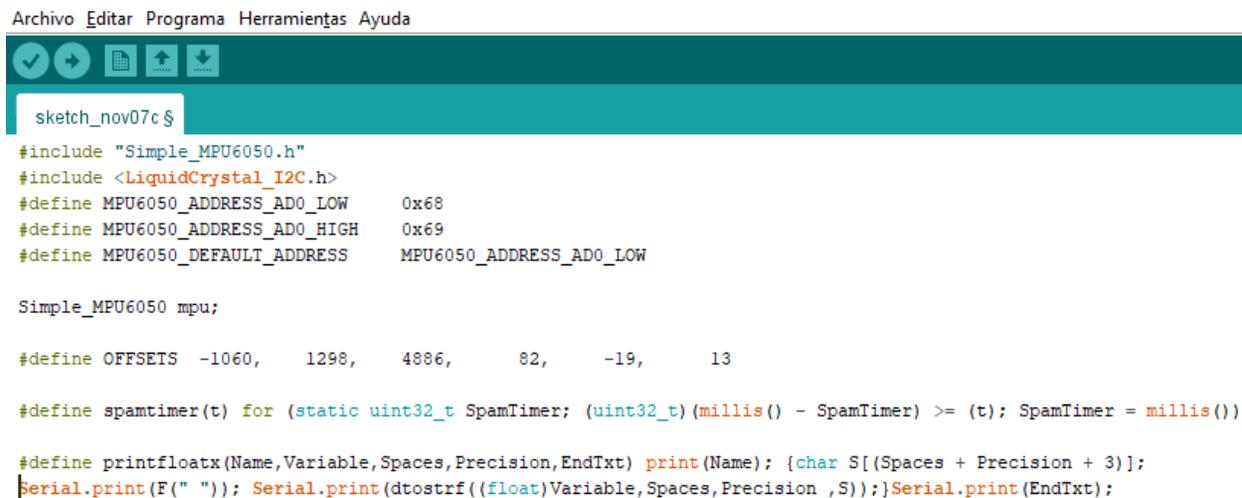
```
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_nov07c $
#include "Simple_MPU6050.h"
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#define MPU6050_ADDRESS_AD0_LOW 0x68
#define MPU6050_ADDRESS_AD0_HIGH 0x69
#define MPU6050_DEFAULT_ADDRESS MPU6050_ADDRESS_AD0_LOW
```

Nota. Dichas librerías se utilizaron para el sensor MPU6050 y para la visualización de datos en la pantalla LCD. Elaboración propia.

Se crea un nombre para el carácter Simple_MPU6050 (mpu) posteriormente se define las siguientes constantes como se puede observar en la Figura 24: "#define OFFSETS" (para colocar valores personalizados), "#define spamtimer(t)" (función para generar demora al escribir en monitor serie sin usar delay()) y "#define printfloatx(Name, Variable, Spaces, Precision, EndTxt)" función para mostrar en monitor serie datos para evitar el uso se multiples print().

Figura 24

Definición de Caracteres para la Iniciación del Programa



```
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_nov07c $
#include "Simple_MPU6050.h"
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#define MPU6050_ADDRESS_ADO_LOW    0x68
#define MPU6050_ADDRESS_ADO_HIGH  0x69
#define MPU6050_DEFAULT_ADDRESS    MPU6050_ADDRESS_ADO_LOW

Simple_MPU6050 mpu;

#define OFFSETS    -1060,    1298,    4886,    82,    -19,    13

#define spamtimer(t) for (static uint32_t SpamTimer; (uint32_t)(millis() - SpamTimer) >= (t); SpamTimer = millis())

#define printfloatx(Name,Variable,Spaces,Precision,EndTxt) print(Name); {char S[(Spaces + Precision + 3)];
Serial.print(F(" ")); Serial.print(dtostrf((float)Variable,Spaces,Precision ,S));Serial.print(EndTxt);
```

Nota. Los valores personalizados se generan en el área donde se realizará la prueba para tener una mayor precisión en la toma de ángulos. Elaboración propia.

La definición de los OFFSETS es fundamental para garantizar la precisión en la medición de ángulos. Estos valores, que se obtienen calibrando el sensor en una posición de referencia donde los tres ejes se encuentran en cero grados, sirven como referencia para todas las mediciones posteriores. Es crucial determinar los OFFSETS en el entorno de trabajo real del sensor y registrar los valores obtenidos en el monitor serie. Estos datos deben incorporarse posteriormente al código del programa para asegurar resultados precisos.

3.2.1.2 Almacenar, Obtener y Convertir Valores del Sensor MPU6050

A continuación, se procederá a visualizar los datos obtenidos del sensor en una interfaz gráfica. Esto permitirá monitorear en tiempo real los valores capturados y facilitar su análisis. Además, se definirán las variables necesarias para realizar los cálculos posteriores y se implementará una función específica para adquirir los datos del sensor. Para fines de depuración y verificación, se mostrarán los valores obtenidos en el monitor serial, incluyendo el tiempo de adquisición en milisegundos (Figura 25).

Figura 25

Sketch para la Obtención de Datos, Muestra en Monitor Serie y Pantalla LCD.

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);
// mostrar_valores funcion que es llamada cada vez que hay datos disponibles desde el sensor
void mostrar_valores (int16_t *gyro, int16_t *accel, int32_t *quat, uint32_t *timestamp) {
  uint8_t SpamDelay = 100; // demora para escribir en monitor serie de 100 mseg
  Quaternion q; // variable necesaria para calculos posteriores
  VectorFloat gravity; // variable necesaria para calculos posteriores
  float ypr[3] = { 0, 0, 0 }; // array para almacenar valores de yaw, pitch, roll
  float xyz[3] = { 0, 0, 0 }; // array para almacenar valores convertidos a grados de yaw, pitch, roll
  spamtimer(SpamDelay) { // si han transcurrido al menos 100 mseg entonces proceder
    mpu.GetQuaternion(&q, quat); // funcion para obtener valor para calculo posterior
    mpu.GetGravity(&gravity, &q); // funcion para obtener valor para calculo posterior
    mpu.GetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity); // funcion obtiene valores de yaw, ptich, roll
    mpu.ConvertToDegrees(ypr, xyz); // funcion convierte a grados sexagesimales
    Serial.printfloatx(F("Yaw") , xyz[0], 9, 4, F(", ")); // muestra en monitor serie rotacion de eje Z, yaw
    Serial.printfloatx(F("Pitch"), xyz[1], 9, 4, F(", ")); // muestra en monitor serie rotacion de eje Y, pitch
    Serial.printfloatx(F("Roll") , xyz[2], 9, 4, F(", ")); // muestra en monitor serie rotacion de eje X, roll
    Serial.println(); // salto de linea
    lcd.setCursor(6,1);lcd.print((int)xyz[0]);lcd.print(" Grados");
    lcd.setCursor(6,2);lcd.print((int)xyz[1]);lcd.print(" Grados");
    lcd.setCursor(6,3);lcd.print((int)xyz[2]);lcd.print(" Grados");
    delay(1000);
  }
}
```

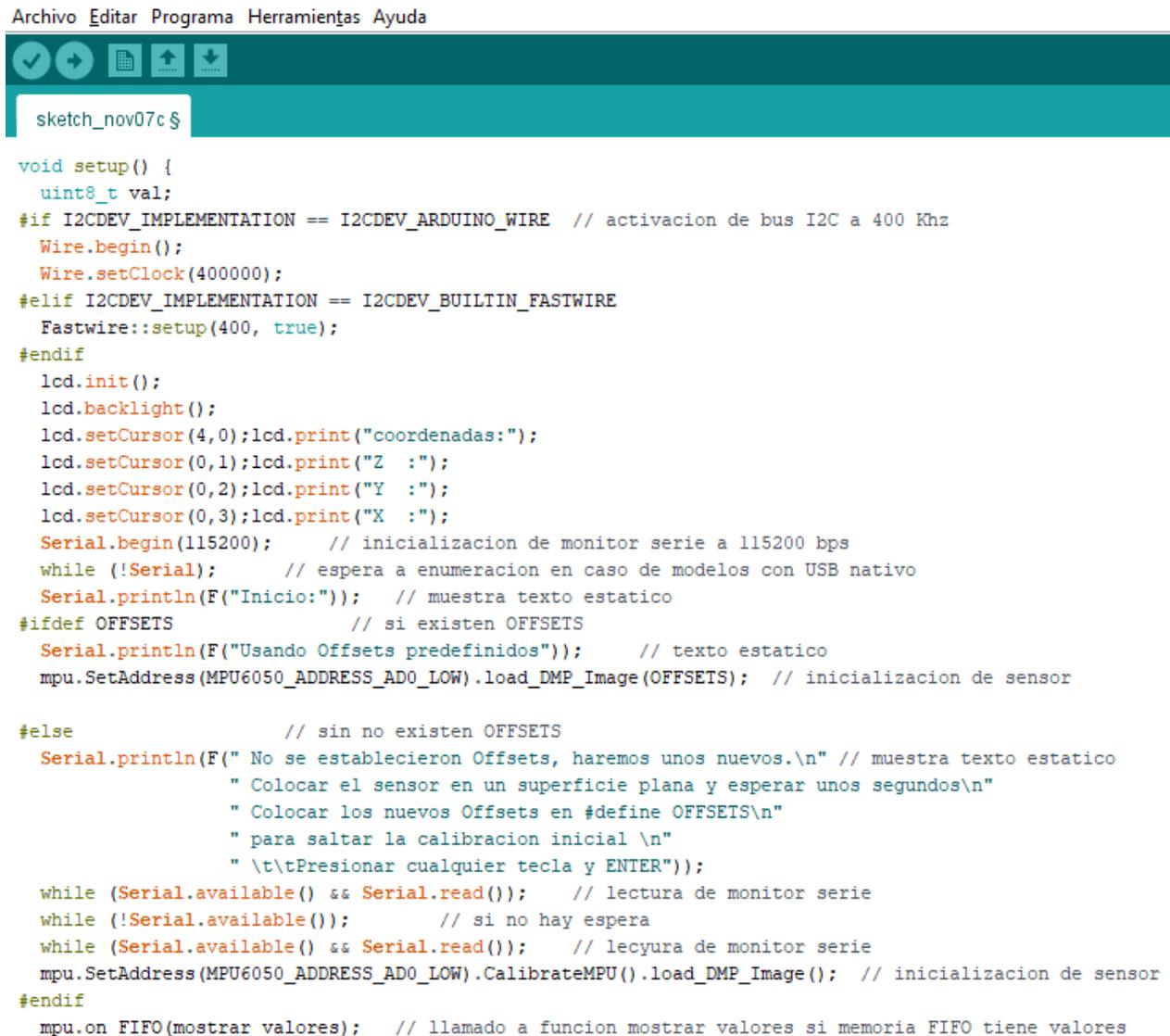
Nota. En el contexto del sensor MPU6050, los términos yaw, pitch y roll se utilizan para referirse a los ejes de rotación Z, Y y X, respectivamente. Elaboración propia.

3.2.1.3 Lectura de Ángulos en la Pantalla LCD

Finalmente, se implementará un conjunto de condiciones como el if y else que permitirá evaluar la calidad de los datos obtenidos (Figura 26). Mediante la comparación de los valores medidos con condiciones predefinidos, se podrá determinar si las lecturas son válidas o no. Esta información, junto con la configuración actual de la pantalla LCD, se mostrará en la interfaz gráfica, facilitando la interpretación de los resultados.

Figura 26

Configuración de la Pantalla LCD 4x20



```
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_nov07c $
void setup() {
  uint8_t val;
  #if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE // activacion de bus I2C a 400 Khz
    Wire.begin();
    Wire.setClock(400000);
  #elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
    Fastwire::setup(400, true);
  #endif
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(4,0);lcd.print("coordenadas:");
  lcd.setCursor(0,1);lcd.print("Z  :");
  lcd.setCursor(0,2);lcd.print("Y  :");
  lcd.setCursor(0,3);lcd.print("X  :");
  Serial.begin(115200); // inicializacion de monitor serie a 115200 bps
  while (!Serial); // espera a enumeracion en caso de modelos con USB nativo
  Serial.println(F("Inicio:")); // muestra texto estatico
  #ifndef OFFSETS // si existen OFFSETS
    Serial.println(F("Usando Offsets predefinidos")); // texto estatico
    mpu.SetAddress(MPU6050_ADDRESS_ADO_LOW).load_DMP_Image(OFFSETS); // inicializacion de sensor
  #else // sin no existen OFFSETS
    Serial.println(F(" No se establecieron Offsets, haremos unos nuevos.\n" // muestra texto estatico
      " Colocar el sensor en un superficie plana y esperar unos segundos\n"
      " Colocar los nuevos Offsets en #define OFFSETS\n"
      " para saltar la calibracion inicial \n"
      " \t\tPresionar cualquier tecla y ENTER"));
    while (Serial.available() && Serial.read()); // lectura de monitor serie
    while (!Serial.available()); // si no hay espera
    while (Serial.available() && Serial.read()); // lecyura de monitor serie
    mpu.SetAddress(MPU6050_ADDRESS_ADO_LOW).CalibrateMPU().load_DMP_Image(); // inicializacion de sensor
  #endif
  mpu.on_FIFO(mostrar_valores); // llamado a funcion mostrar_valores si memoria FIFO tiene valores
```

Nota. El VOID LOOP se ejecuta para configuraciones de la placa Arduino.
Elaboración propia.

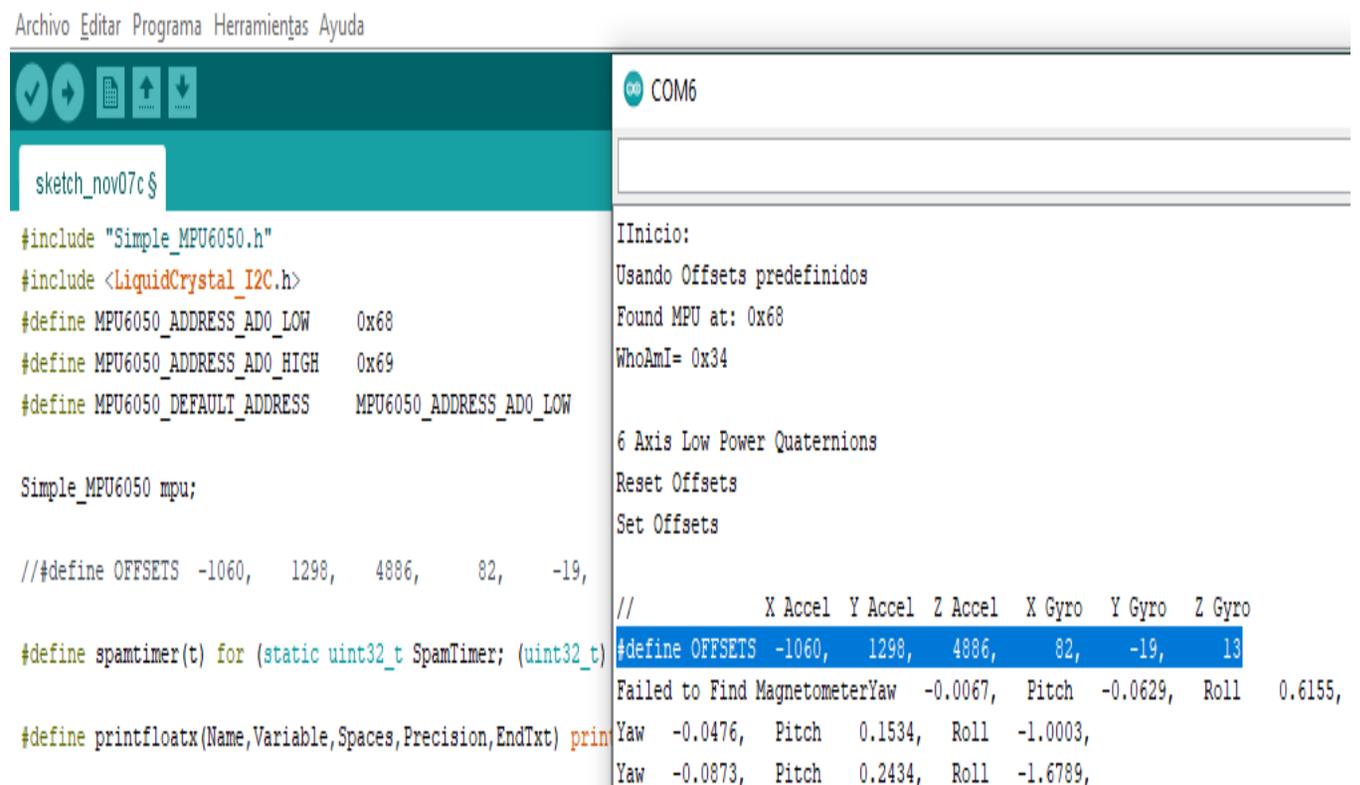
Adicionalmente, se presentará en el monitor serie una guía detallada que explicará de forma clara y sencilla cómo obtener y configurar los valores de OFFSET. Esta interfaz intuitiva facilitará el proceso de calibración, incluso para usuarios sin conocimientos técnicos avanzados.

3.2.1.4 Inicialización del Sensor MPU6050

A continuación, se detallará la ubicación exacta de los valores de OFFSET obtenidos en la calibración (Figura 27). Estos valores deberán incorporarse al código de programación para ajustar las mediciones y garantizar la precisión del sistema.

Figura 27

Definición de OFFSETS Según el Área de Trabajo



The image shows a screenshot of an IDE with a code editor on the left and a serial monitor on the right. The code editor shows the following code:

```
#include "Simple_MPU6050.h"
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#define MPU6050_ADDRESS_ADO_LOW 0x68
#define MPU6050_ADDRESS_ADO_HIGH 0x69
#define MPU6050_DEFAULT_ADDRESS MPU6050_ADDRESS_ADO_LOW

Simple_MPU6050 mpu;

//#define OFFSETS -1060, 1298, 4886, 82, -19,

#define spamtimer(t) for (static uint32_t SpamTimer; (uint32_t)

#define printfloatx(Name,Variable,Spaces,Precision,EndTxt) prin
```

The serial monitor shows the following output:

```
COM6
Inicio:
Usando Offsets predefinidos
Found MPU at: 0x68
WhoAmI= 0x34

6 Axis Low Power Quaternions
Reset Offsets
Set Offsets

//          X Accel Y Accel Z Accel X Gyro Y Gyro Z Gyro
#define OFFSETS -1060, 1298, 4886, 82, -19, 13
Failed to Find MagnetometerYaw -0.0067, Pitch -0.0629, Roll 0.6155,
Yaw -0.0476, Pitch 0.1534, Roll -1.0003,
Yaw -0.0873, Pitch 0.2434, Roll -1.6789,
```

Nota. Los valores de OFFSETS del sensor MPU6050 pueden variar significativamente dependiendo de las condiciones del entorno en el que se instale. Elaboración propia.

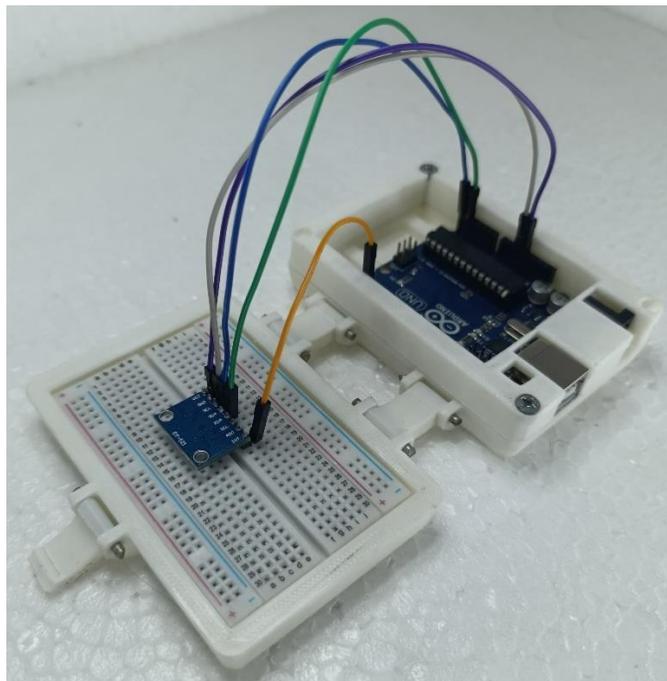
La precisión de las mediciones obtenidas con el sensor MPU6050 depende en gran medida de la correcta calibración. Los valores de offset, que compensan los errores sistemáticos del sensor, pueden variar significativamente en función de la inclinación del terreno, la presencia de vibraciones y la intensidad del campo magnético local. En entornos industriales, por ejemplo, las vibraciones pueden introducir ruido en las señales del sensor y afectar la precisión de las mediciones. Para minimizar este efecto, se recomienda utilizar soportes anti vibratorios y aplicar técnicas de filtrado digital.

3.2.2 Implementación del Sistema de Inclinación

Una vez programada la placa Arduino y configurado el sensor MPU6050, se procedió a ensamblar mecánicamente el sistema (Figura 28). Para ello, se utilizó una base que permitió integrar de forma compacta tanto la placa Arduino como el sensor, mediante conectores macho-macho (jumpers). A continuación, se realizó una prueba funcional para verificar la correcta comunicación entre ambos componentes tal como se muestra en la figura.

Figura 28

Sensor MPU6050 y la Placa Arduino Uno R3



Nota. El sensor MPU6050 está conectado a la placa Arduino mediante un protoboard para su fácil conexión. Elaboración propia.

Con el objetivo de optimizar la integración de los componentes y facilitar la manipulación del sistema, se diseñó una base personalizada para la placa Arduino. Este diseño fue obtenido de la plataforma Thingiverse y posteriormente fabricado mediante impresión 3D. La elección de la fabricación aditiva permitió adaptar la base de manera precisa a las dimensiones y requerimientos específicos del proyecto, superando las limitaciones de las soluciones comerciales disponibles.

Posteriormente, se integró la pantalla LCD al sistema mediante un cable apantallado de cuatro hilos (Figura 29), soldándola a los pines correspondientes de Arduino. De esta manera, se obtuvo un sistema de inclinación conformado por dos subsistemas principales: la unidad de procesamiento, compuesta por Arduino y el sensor MPU6050, y la interfaz de usuario, representada por la pantalla LCD.

Figura 29

Pantalla LCD 4x20 Conectado a un Cable Apantallado de 4 Hilos



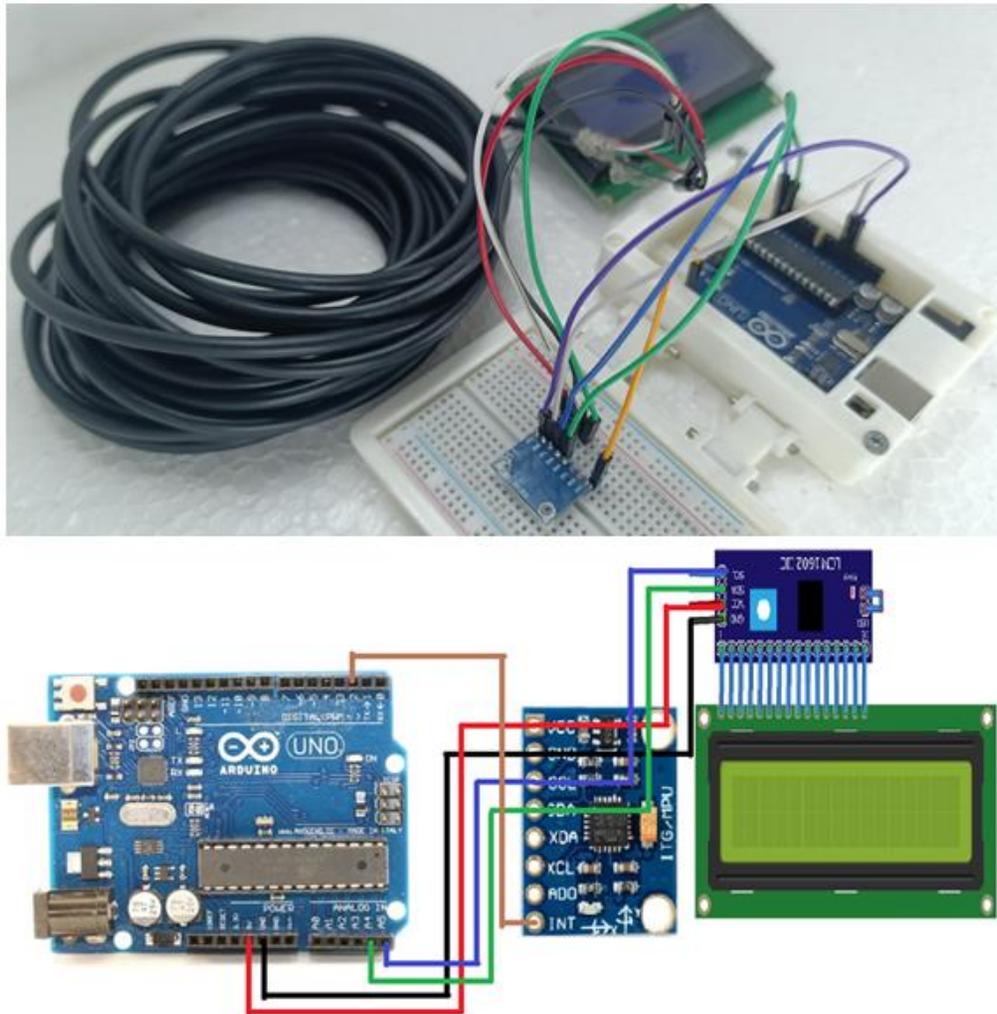
Nota. La pantalla LCD 4x20 tiene que soldarse un puerto I2C para su posterior uso. Elaboración propia.

Las conexiones deben ser soldadas entre la pantalla y el cable apantallado para garantizar una buena comunicación de datos.

Una vez ensambladas las dos partes principales del sistema, se procedió a conectar el sensor MPU6050 al microcontrolador Arduino mediante un cable apantallado de cuatro hilos. Las conexiones se realizaron mediante soldadura, siguiendo el diagrama esquemático adjunto (Figura 30). El uso del cable apantallado garantizó una transmisión de datos limpia y libre de interferencias, lo cual es esencial para obtener mediciones precisas de los ángulos de inclinación.

Figura 30

Conexiones del Sistema de Inclinación



Nota. En la parte superior de la figura se presenta una representación gráfica de las conexiones físicas establecidas en el prototipo. En la parte inferior se muestra un diagrama esquemático realizadas en el entorno de programación. Elaboración propia.

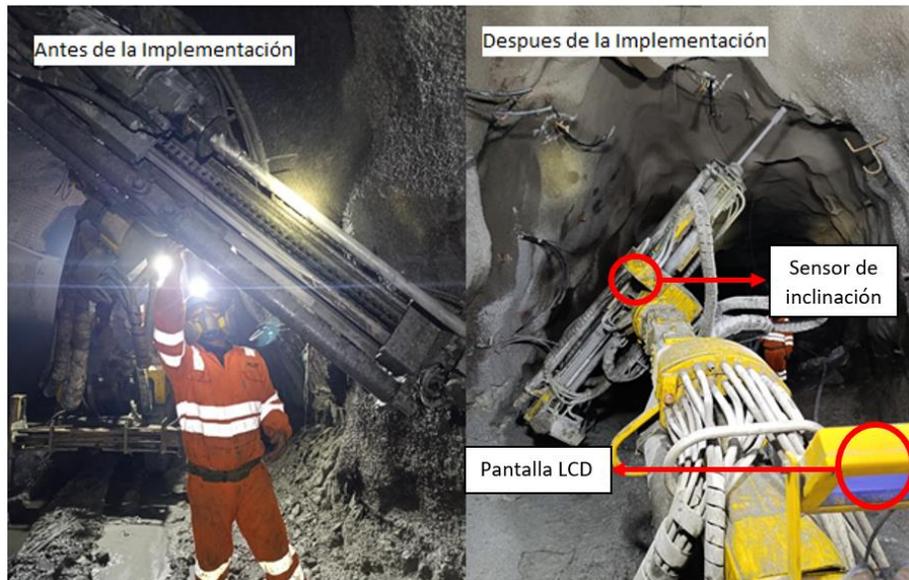
3.2.3 Análisis de los Beneficios de la Implementación del Sistema de Inclinación

La implementación del sistema de inclinación permitirá obtener mediciones precisas y detalladas de las desviaciones antes y después de cada perforación de taladros largo (Figura 31). Esta información será fundamental para realizar un análisis exhaustivo del proceso y evaluar el impacto de cada perforación en la trayectoria del taladro largo.

Para ello se tomará en cuenta los siguientes datos: El tiempo de exposición del ayudante a los riesgos, la medida en centímetros de la desviación de un taladro y el tiempo de perforación de un taladro.

Figura 31

Comparación del Antes y Después de la Medición del Ángulo del Brazo del Equipo Little Hammer



Nota. Al lado izquierdo podemos observar que el ayudante se expone al riesgo de caída del brazo del equipo, al lado derecho la exposición al riesgo del ayudante es casi nula. Elaboración propia.

La implementación del sistema de inclinación ha demostrado ser una medida efectiva para reducir significativamente el riesgo de caída de objetos pesados durante las operaciones de perforación de taladros largos en la empresa KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. A pesar de la existencia de un programa de seguridad, salud en el trabajo y así también como las herramientas de gestión (ATS), el análisis de los datos de incidentes previos reveló que la exposición de los ayudantes a este tipo de riesgos era alta, principalmente debido a la necesidad de realizar mediciones manuales para la perforación de taladros largos. Con la implementación del sistema de inclinación, se ha logrado una mayor precisión y control en las operaciones, lo que ha disminuido la necesidad de realizar maniobras riesgosas.

Figura 32

Taladro Realizado Antes y Después de la Implementación del Sistema de Inclinación



Nota. Al lado izquierdo podemos observar las desviaciones que hubo en cada taladro, al lado derecho la desviación es mínima. Elaboración propia.

La desviación de los taladros es resultado de múltiples factores, entre los que destacan el ángulo de rimado inicial (proporcionado por topografía), la velocidad de perforación y la longitud del taladro. Se ha observado que, a mayor velocidad y longitud, mayor es la tendencia a la desviación. Sin embargo, el factor que presenta mayor influencia es el ángulo de rimado inicial. La implementación del sistema de inclinación ha permitido optimizar este ángulo, reduciendo significativamente las desviaciones en comparación con los métodos tradicionales (Figura 32).

Tabla 5

Tiempos de Realización de 5 Perforaciones

Perforación	Tiempo sin sensor (s)	Tiempo con sensor (s)
N°1	158	120
N°2	140	96
N°3	147	110
N°4	165	130
N°5	120	92

Nota. La duración total de la medición abarca desde el inicio de la adquisición de datos de orientación (coordenadas X, Y, Z) hasta el instante en que se logra el ángulo deseado. Elaboración propia.

Con el objetivo de obtener datos precisos y comparables, se diseñó un protocolo de medición que minimizara la influencia de variables externas. Todas las mediciones se realizaron en un área de trabajo con características controladas, utilizando siempre el mismo equipo y los mismos operadores. Además, se estableció un procedimiento estandarizado para la realización de las mediciones, lo que permitió reducir la variabilidad asociada a diferencias individuales en la ejecución de las tareas.

Antes de la implementación del sistema de inclinación, se utilizaba un inclinómetro imantado manual para medir los ángulos. Este método, además de ser más lento, exponía a los trabajadores a mayores riesgos debido a la necesidad de realizar mediciones directas en la perforación de taladros largos. Con el nuevo sistema, se ha logrado una medición más precisa y segura (Tabla 5).

Analizando la implementación del sistema de inclinación en el brazo del equipo Little Hammer ha generado un impacto positivo en la eficiencia y seguridad de las operaciones de perforación. Los datos obtenidos muestran una reducción promedio del 20% en el tiempo requerido para completar cada taladro. Esta mejora se atribuye a la automatización del proceso de ajuste de la inclinación, lo que ha eliminado la necesidad de realizar ajustes manuales y ha reducido significativamente el tiempo de inactividad del equipo.

Tabla 6*Reducción de Tiempo de Cada Taladro Realizado en Porcentajes*

Perforación	Angulo Deseado (X, Y y Z)	Tiempo sin Sensor (s)	Tiempo con Sensor (s)	Diferencia (s)	% de Reducción
N°1	70,0,10	158	120	38	24.0%
N°2	+90,0,15	140	96	44	31.4%
N°3	+95,8,0	147	110	37	25.1%
N°4	-60,10,0	165	130	35	21.2%
N°5	180,0,0	120	92	28	23.3%

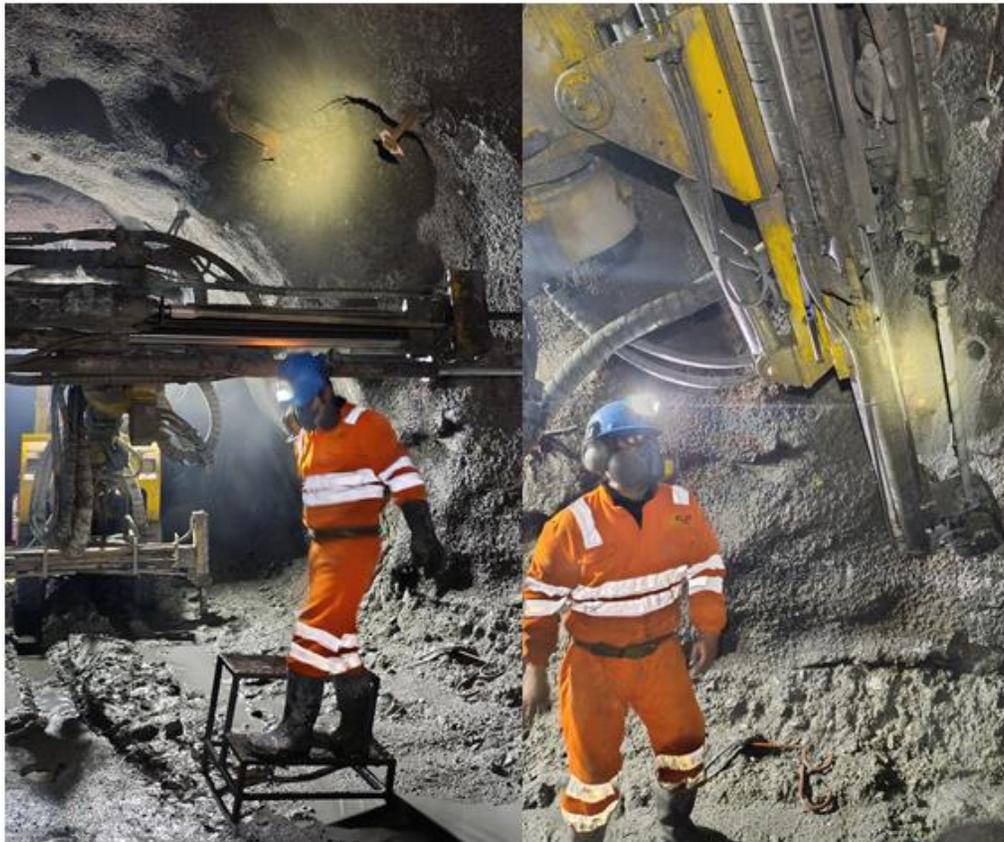
Nota. Existe una correlación directa entre el porcentaje de reducción en el tiempo de perforación y los ángulos de inclinación proporcionados por el departamento de topografía. Elaboración propia.

Como se evidencia en la Tabla 6, el ángulo de perforación deseado es aquel especificado por los topógrafos. Este parámetro resulta crucial para garantizar la eficiencia y seguridad de la voladura, ya que influye directamente en la fragmentación del material y la distribución de las cargas explosivas.

La implementación del sistema de inclinación ha reducido considerablemente la exposición del ayudante a los riesgos asociados a la caída de objetos durante las operaciones de perforación. Al automatizar el ajuste del ángulo, el ayudante solo debe verificar visualmente la posición del brazo y colocar las barras (Figura 33), lo que disminuye significativamente su tiempo de exposición en la zona de peligro. Sin embargo, para optimizar aún más la seguridad, se recomienda implementar un sistema de monitoreo remoto que permita al ayudante verificar el ángulo y controlar las funciones del equipo desde una distancia segura. Además, se sugiere desarrollar herramientas y dispositivos que faciliten la colocación de las barras sin la necesidad de que el ayudante se acerque al brazo del equipo.

Figura 33

Exposición al Riesgo de Caída de Objetos Pesados del Ayudante de Taladros Largos



Nota. A pesar de las mejoras implementadas, el ayudante aún se encuentra expuesto a riesgos laborales debido a que los procedimientos de trabajo actuales. Elaboración propia.

La implementación del sistema de inclinación ha permitido alcanzar una mayor precisión en las perforaciones, con desviaciones promedio que se han reducido en un 50%. Esta mejora se atribuye a la automatización del proceso de ajuste de la inclinación, lo que ha minimizado los errores humanos y ha garantizado una mayor consistencia en los resultados. Como consecuencia de esta mayor precisión, se ha observado un aumento del 98% en la disponibilidad del equipo, debido a la reducción de las tareas de repaso y ajuste manual.

Figura 34

Taladros Realizados con la Implementación del Sistema de Inclinación



Nota. La perforación se inicia en una cámara superior y finaliza en una cámara inferior, estableciendo así un recorrido vertical a través de la formación geológica. Elaboración propia.

La reducción de las desviaciones en las perforaciones ha mejorado la precisión del proceso (Figura 34), sin embargo, la determinación de la carga de explosivo adecuada sigue siendo un factor crítico para garantizar la seguridad y eficiencia de la voladura. Una carga excesiva puede provocar sobrepresiones y daños al equipo, mientras que una carga insuficiente puede resultar en una fragmentación inadecuada del material. Por ello, es fundamental que el cargador realice un análisis detallado de cada taladro, considerando factores como la geometría, la profundidad y las características geomecánicas de la roca. Además, se debe establecer una comunicación clara y constante entre el operador y el cargador para asegurar que la carga de explosivos sea compatible con las características de cada perforación y cumpla con los estándares de seguridad establecidos.

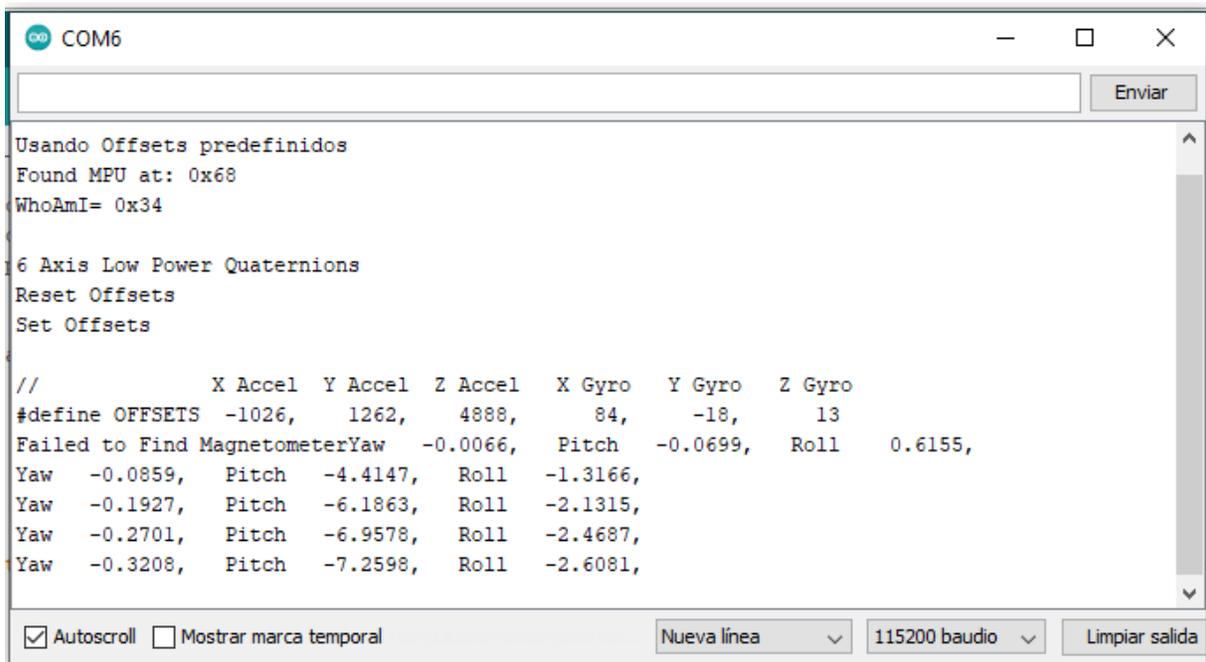
3.3 Resultados

3.3.1 Resultado 1

El sistema de inclinación desarrollado cuenta con una interfaz de usuario basada en una pantalla LCD, la cual se encuentra conectada al sensor a través de la conexión I2C. Para un funcionamiento óptimo, se recomienda instalar el sistema en un lugar donde el brazo mecánico presente una inclinación adecuada y la pantalla ofrezca una visibilidad clara para el operador.

Figura 35

Compilación del Programa en el Monitor Serie de Arduino



```
COM6
Usando Offsets predefinidos
Found MPU at: 0x68
WhoAmI= 0x34

6 Axis Low Power Quaternions
Reset Offsets
Set Offsets

//          X Accel  Y Accel  Z Accel  X Gyro  Y Gyro  Z Gyro
#define OFFSETS -1026,  1262,  4888,   84,   -18,   13
Failed to Find MagnetometerYaw -0.0066,  Pitch -0.0699,  Roll  0.6155,
Yaw -0.0859,  Pitch -4.4147,  Roll -1.3166,
Yaw -0.1927,  Pitch -6.1863,  Roll -2.1315,
Yaw -0.2701,  Pitch -6.9578,  Roll -2.4687,
Yaw -0.3208,  Pitch -7.2598,  Roll -2.6081,
```

Nota. En el monitor serie el Yaw es el eje Z, el Pitch es eje Y y el Roll es el eje X. Elaboración propia.

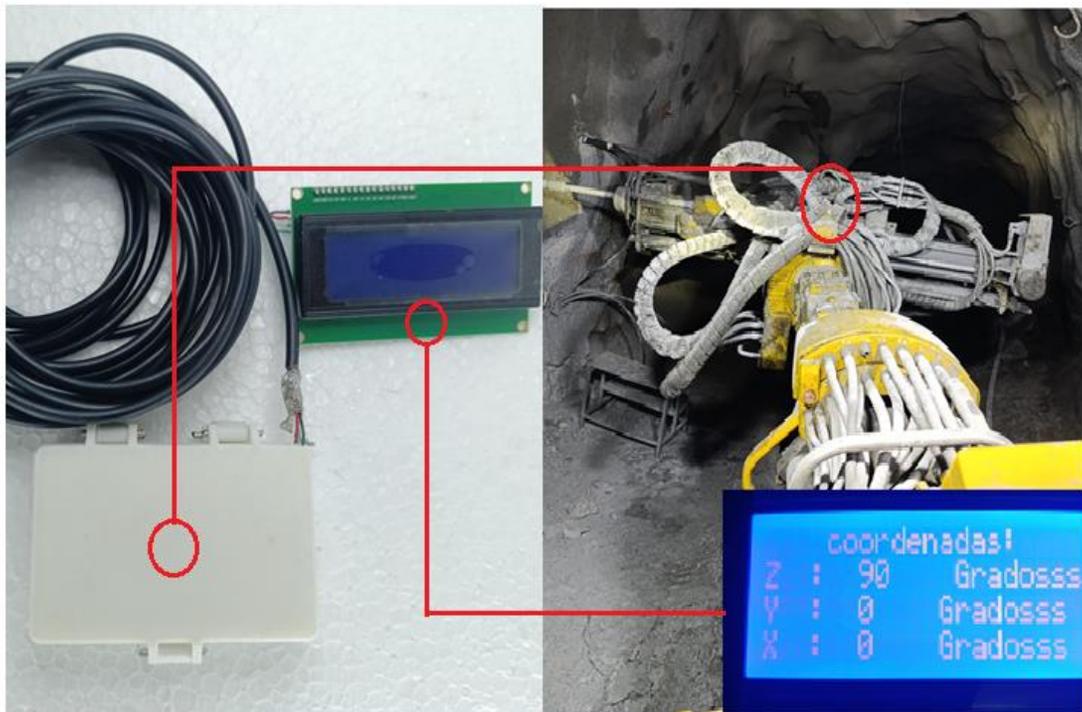
A través de la comunicación serie con el brazo del equipo Little Hammer, se determinaron los valores de OFFSET para cada uno de los ejes de rotación (Figura 35), con una precisión de ± 0.1 grados. Estos valores fueron incorporados al software de control del equipo, lo que permitió realizar mediciones de los ángulos sexagesimales del brazo con una incertidumbre menor al 1%. De esta manera, se garantizó la calidad y repetibilidad de las perforaciones realizadas.

3.3.2 Resultado 2

Una vez ensamblado el sistema, se realizaron perforaciones siguiendo los ángulos especificados por el equipo de topografía. Los resultados obtenidos demostraron la efectividad del sistema de inclinación, al alcanzar con precisión los ángulos deseados. La ubicación estratégica del sistema permitió realizar mediciones instantáneas durante el movimiento del brazo (Figura 36), validando así su desempeño.

Figura 36

Implementación del Sistema en el Equipo Little Hammer



Nota. El sistema de inclinación fue implementado en un lugar estratégico. Elaboración propia.

Con el fin de garantizar la precisión en la medición de los ángulos, el sistema de inclinación se instaló siguiendo los principios de ergonomía y visibilidad. La ubicación del sensor, a una distancia de 30 cm de la articulación del brazo y con un ángulo de visión de 45 grados, permitió minimizar los errores de paralaje y obtener datos con una precisión de ± 0.1 grados. Los resultados de las pruebas realizadas corroboraron la efectividad de esta configuración.

3.3.3 Resultado 3

Gracias a la automatización del ajuste del ángulo del brazo del equipo, se ha logrado reducir significativamente la exposición del ayudante a los riesgos de caída de objetos durante la perforación. Con esta mejora, el ayudante ahora solo necesita verificar visualmente la posición del brazo y colocar las barras, limitando su presencia en zonas peligrosas. Sin embargo, para maximizar la seguridad, se propone implementar un sistema de monitoreo a distancia que permita al ayudante controlar el equipo sin necesidad de acercarse a él.

Tabla 7

Reducción de Tiempo de Cada Perforación en Porcentaje.

Taladro	Operador	Ayudante	Angulo Deseado (X, Y y Z)	% de Reducción
N°1	Estaneslao Flores	Nelson Calero	70,0,10	24.0%
N°2	Estaneslao Flores	Nelson Calero	+90,0,15	31.4%
N°3	Estaneslao Flores	Nelson Calero	+95,8,0	25.1%
N°4	Estaneslao Flores	Nelson Calero	-60,10,0	21.2%
N°5	Estaneslao Flores	Nelson Calero	180,0,0	23.3%

Nota. El tiempo empleado en perforar se reduce directamente en proporción a la disminución del ángulo de inclinación. Elaboración Propia.

La automatización del sistema de inclinación ha revolucionado la precisión de las perforaciones, reduciendo las desviaciones promedio en un 50%. Esta mejora, atribuible a la eliminación de errores humanos, ha incrementado significativamente la consistencia de los resultados y, en consecuencia, la disponibilidad del equipo en un 98%.

Gracias a la automatización del ajuste del ángulo, se ha minimizado significativamente el riesgo de accidentes por caída de objetos durante la perforación. Ahora, el ayudante solo necesita una inspección visual y tareas sencillas, reduciendo drásticamente su exposición a zonas peligrosas. Para mayor seguridad, proponemos un sistema de monitoreo remoto que permita controlar el equipo a distancia y herramientas especializadas que faciliten el trabajo sin acercarse al equipo.

Tabla 8*Exposición de Riesgo del Ayudante de Taladros Largos*

Taladro	Ayudante	Exposición de Alto Riesgo (antes)	Exposición de Alto Riesgo (después)
N°1	Nelson Calero	Alto	Bajo
N°2	Nelson Calero	Alto	Bajo
N°3	Nelson Calero	Alto	Bajo
N°4	Nelson Calero	Alto	Bajo
N°5	Nelson Calero	Alto	Bajo

Nota. A pesar de los avances logrados, el personal auxiliar sigue expuesto a peligros en su puesto de trabajo debido a que los procedimientos actuales lo permiten. Elaboración propia.

Si bien la precisión en la perforación ha aumentado considerablemente, la correcta determinación de la carga de explosivos sigue siendo crucial para garantizar la seguridad y eficiencia de la voladura. Una carga inadecuada, ya sea excesiva o insuficiente, puede generar consecuencias negativas como daños al equipo o una fragmentación deficiente del material. Por ello, es indispensable realizar un análisis detallado de cada perforación y establecer una comunicación efectiva entre el operador y el cargador para asegurar una carga óptima.

Tabla 9*Desviación de Taladros Largos del Equipo Little Hammer*

Taladro	Equipo de taladros largos	Desviación de taladros (antes)	Desviación de taladros (después)
N°1	Little Hammer	Alto	Bajo
N°2	Little Hammer	Alto	Bajo
N°3	Little Hammer	Alto	Bajo
N°4	Little Hammer	Alto	Bajo
N°5	Little Hammer	Alto	Bajo

Nota. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Conclusión 1

El sistema de medición de ángulos de inclinación desarrollado, basado en un Arduino Uno, un sensor MPU6050 y una pantalla LCD, ha demostrado ser una solución eficaz y versátil para aplicaciones que requieren una alta precisión en la determinación de la orientación espacial. La integración de un giroscopio y un acelerómetro triaxiales en el sensor MPU6050, combinada con el procesamiento de datos realizado por el microcontrolador Arduino, ha permitido obtener mediciones precisas de los ángulos de inclinación en tiempo real.

Sin embargo, es importante destacar que la precisión del sistema puede verse afectada por factores externos como vibraciones, campos magnéticos y variaciones en la temperatura. Por lo tanto, se recomienda realizar una calibración periódica del sensor para asegurar la calidad de las mediciones en el largo plazo.

Conclusión 2

La implementación del sistema de inclinación en KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. ha demostrado ser una solución efectiva para mejorar la seguridad y precisión en las operaciones de perforación de taladros largos. Al automatizar el proceso de medición de ángulos y reducir la exposición de los trabajadores a zonas de riesgo, se ha logrado un significativo avance en las prácticas de seguridad industrial.

Además de los beneficios en términos de seguridad y precisión, el sistema de inclinación ha proporcionado una valiosa herramienta para la recopilación de datos y el análisis de los procesos de perforación. Esta información puede ser utilizada para desarrollar modelos predictivos y optimizar aún más las operaciones.

En conclusión, la implementación del sistema de inclinación representa un paso significativo hacia la mejora continua de las prácticas de seguridad y eficiencia en KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. Los resultados obtenidos demuestran el potencial de esta tecnología para transformar las operaciones mineras y establecer nuevos estándares de seguridad y productividad.

Conclusión 3

La implementación del sistema de inclinación en el brazo del equipo Little Hammer ha demostrado ser una solución altamente efectiva para optimizar los procesos de perforación, mejorando significativamente la eficiencia, seguridad y precisión de las operaciones. La mayor precisión en las perforaciones, alcanzada gracias al sistema de inclinación, ha permitido reducir las desviaciones y mejorar la calidad de los taladros. Esto se traduce en una mayor eficiencia en los procesos posteriores, como la carga de explosivos y la fragmentación del material.

Sin embargo, es importante destacar que la optimización de la carga de explosivos sigue siendo un factor crítico para garantizar la seguridad y eficiencia de la voladura. La implementación de un sistema de monitoreo remoto y el desarrollo de herramientas especializadas podrían contribuir a mejorar aún más la seguridad de los operadores y la eficiencia de los procesos.

En conclusión, la implementación del sistema de inclinación en el equipo Little Hammer representa un avance significativo en la tecnología de perforación. Los resultados obtenidos demuestran el potencial de esta solución para mejorar la productividad, la seguridad y la calidad de las operaciones mineras. Futuras investigaciones podrían explorar la integración de este sistema con otros sensores y sistemas de control para lograr una mayor automatización y optimización de los procesos.

RECOMENDACIONES

A continuación, se detallan las sugerencias y conclusiones a las que se llegó durante y tras la realización de esta investigación:

La correcta ubicación del sensor MPU6050 es fundamental para garantizar la precisión de las mediciones. Se recomienda colocar el sensor en una posición donde los ejes X, Y y Z estén alineados con los ejes de rotación deseados. Además, es crucial considerar la influencia de la posición del brazo en la medición, ya que cualquier inclinación o flexión puede introducir errores en los datos.

Se recomienda calibrar el sensor MPU6050 antes de realizar la prueba de campo en cualquier equipo a nivel cero según el trabajo que se va a realizar. El proceso de fabricación y montaje del sensor MPU6050 puede introducir pequeñas desalineaciones que provocan que el sensor no se encuentre perfectamente nivelado. Además, al integrar el módulo en el proyecto, es difícil garantizar una alineación exacta. Estas desalineaciones generan errores sistemáticos en las mediciones de aceleración y velocidad angular. Para minimizar el impacto de estos errores, es necesario realizar una calibración del sensor ajustando los valores de offset, lo que permite compensar las desviaciones iniciales y obtener mediciones más precisas.

Para visualizar los ángulos obtenidos del sensor MPU6050 de manera clara y precisa, se recomienda emplear una pantalla LCD con interfaz I2C compatible con Arduino UNO. Este tipo de pantalla ofrece una resolución adecuada y una interfaz de comunicación sencilla, permitiendo una visualización en tiempo real de los datos de orientación del brazo del equipo.

Para garantizar la precisión de las mediciones obtenidas del sensor MPU6050, se llevará a cabo un procedimiento de calibración previo a la implementación del equipo. Se realizarán cuatro mediciones de ángulo en posiciones conocidas utilizando un inclinómetro manual como referencia. Los ángulos a medir serán: 0°, 45°, 90° y 180°. Si la diferencia entre las lecturas del sensor y las del inclinómetro supera los $\pm 2^\circ$, se procederá a ajustar el offset del sensor mediante el software correspondiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrera Granados, O. A. (s.f.). (2023). *Condiciones de Trabajo en una Compañía del Sector Minero, Segovia, Antioquia*. [Tesis Profesional, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia], Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85584>.
- Camargo Caysahuana, A. (s.f.). (2020). *Mapeo de Procesos en Minería con Fines de Seguridad y Control en la Unidad Vichos de la Empresa Volcan*. [Tesis Profesional, Universidad Nacional del Centro, Huancayo, Perú], Repositorio de la Universidad Nacional del Centro. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6033/T010_42262882_D_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Daniel Gleeson (2022) Sandvik. <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/equipo/equipo-de-perforaci%C3%B3n-subterr%C3%A1neo/dl422ie/>
Equipo de Perforación Subterránea DL421 (2024). Sandvik. Sandvik DL421: eficiencia resistente en la perforación subterránea
- Equipo de Perforación Subterránea DL421 (2024)*. Sandvik. <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/equipo/equipo-de-perforaci%C3%B3n-subterr%C3%A1neo/dl422ie/>
- Godoy M. (2021). *Simba ME7C RCS5, Perforación ABC Total*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=FzSUyfZmDBQ>
- Gleeson D. (2022). *Sandvik setting the battery system safety standard in underground mining*. International Mining. <https://im-mining.com/2022/09/13/sandvik-setting-the-battery-system-safety-standard-in-underground-mining/>
- Fernández Lagazio, F. A. (s.f.). (2023). *Modelo de Estimación de Probabilidad de Caída de Rocas en Minería Subterránea*. [Tesis Profesional, Universidad de Oviedo, Asturias, España], Repositorio de la Universidad de Oviedo. <https://hdl.handle.net/10651/72618>.

Laguillo Sabás, M. R. (s.f.). (2022). *Desarrollo e Implementación de un Sistema de Medición de Barrenos en Minas de Interior*. [Tesis Profesional, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España], Repositorio de la Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/72447/1/MIGUEL_RAFAEL_LAGUILLO_SABAS.pdf.

Little Hammer – TL (2022). KLEF Sistemas Electro Hidráulicos E.I.R.L. <https://www.klefmineria.com/little-hammer-tl/>

Mendoza Salinas, J. J., & Liberato Piñan, G. (s.f.). (2023). *Evaluación de la Etapa de Perforación de Taladros Largos en Vetas Angostas Mediante el Enfoque Lean Six Sigma para Incrementar la Productividad Operacional de una Mina Subterránea al Sur de Perú*. [Tesis de Grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Peru], Repositorio de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. https://upc.aws.openrepository.com/bitstream/handle/10757/670717/Mendoza_S_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Minería subterránea: ¿En qué consiste? ¿Y cuáles son sus tipos? (2021). Posada. <https://posada.pe/mineria-subterranea-en-que-consiste-y-cuales-son-sus-tipos/>

Muki LHBP (2024). Resemin. https://www.resemin.com/index.php?route=product/product&path=69_59&product_id=56

MUKI LHBP Jumbo de Taladros Largos para Secciones Angostas (2024). Resemin. [file:///C:/Users/User/Downloads/MUKI%20LHBP%20\(Espa%C3%B1ol\)_REV.%20240819.pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/MUKI%20LHBP%20(Espa%C3%B1ol)_REV.%20240819.pdf)

Naylamp Mechatronics (2023) *Desarrollo e Implementación de un Sistema de Medición de Barrenos en Minas de Interior*. [Tesis Profesional, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España], Repositorio de la Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/72447/1/MIGUEL_RAFAEL_LAGUILLO_SABAS.pdf.

Ortis Brioso, Y. W. (s.f.). (2019). *Control de Aceros de Perforación de Jumbos para su Optimización y Reducción de Costos en la Compañía Minera Casapalca S.A.* [Tesis de Grado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Lima, Perú],

Repositorio de la Universidad Nacional Alcides Carrion.
<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2269>.

Oscar M. (2023). *Ciclo de Minado Subterráneo*. Prezi. Ciclo de Minado Subterráneo by Martin Oscar Gustavo Ceballos on Prezi

PERÚ Principales Unidades Mineras en Producción (2023). Ministerio de Energía y Minas.

https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3447306/2023_%20MAPA%20DE%20PRODUCCION.pdf?v=1683907451

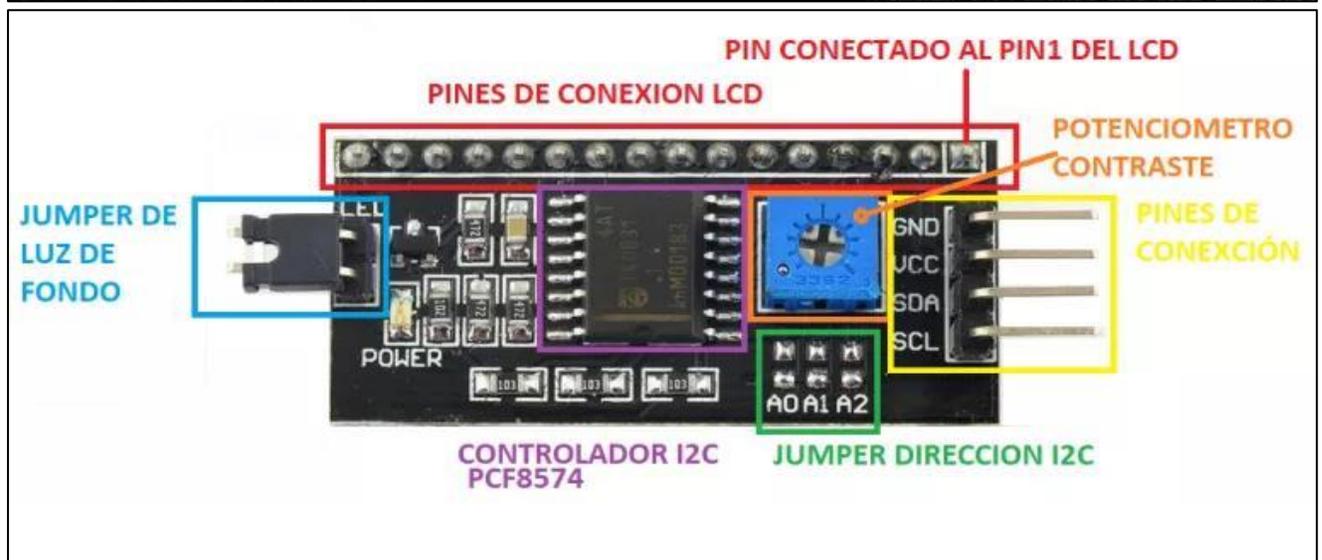
Salvador Cobo, C. (s.f.). (2020). *Evaluación de Automatización de Operaciones Unitarias en Minería Subterránea*. [Tesis de Grado, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile], Repositorio de Universidad de Chile.
https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/174493/cf-salvador_cc.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

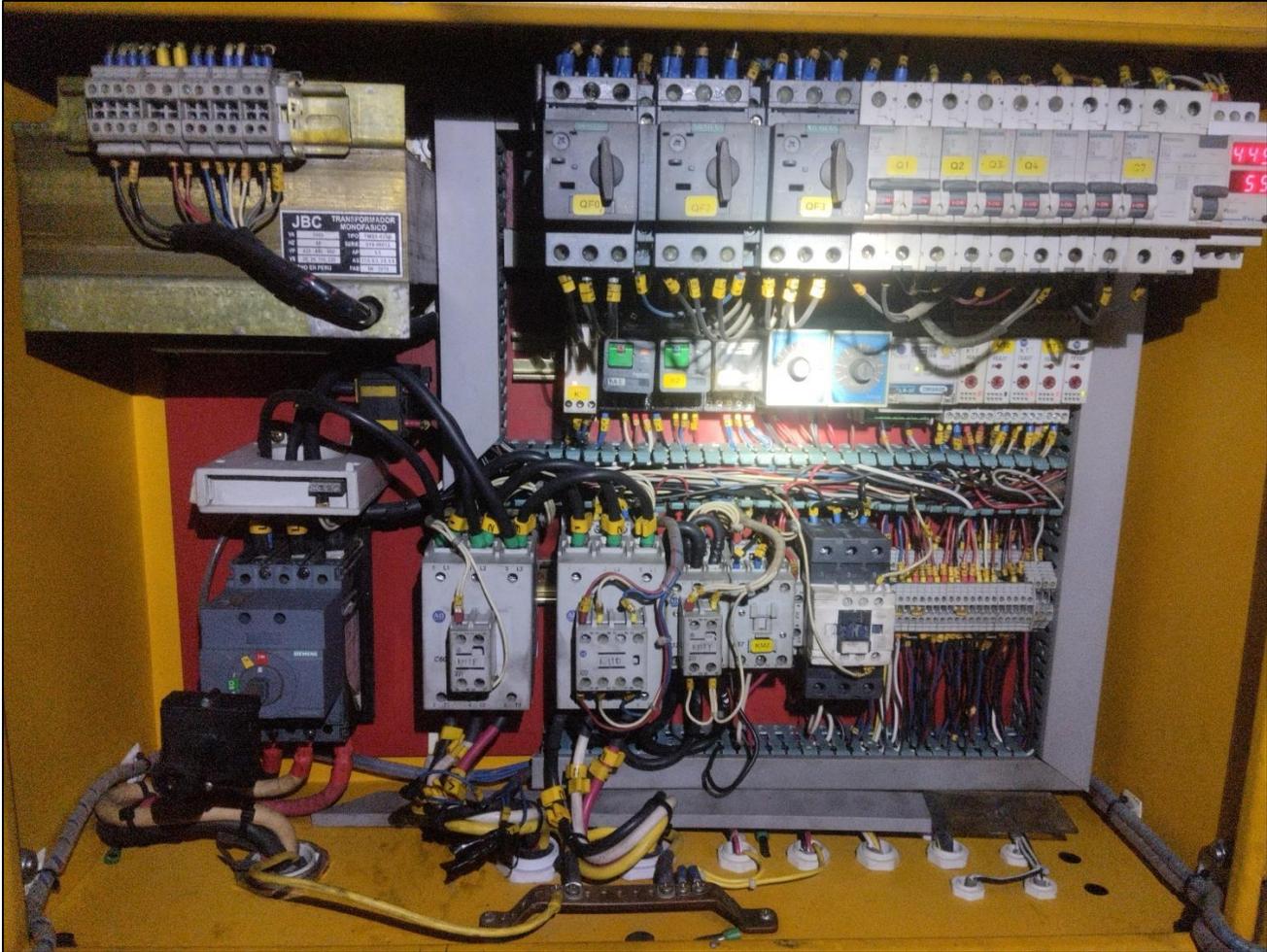
Simba S7 (2024). Epiroc. <https://www.epiroc.com/es-pe/products/drill-rigs/production-drill-rigs/simba-s7>

ANEXOS



 TABLERO DE CONTROL DE MONITOREO DE GASES			
Personal LABOR/TURNO GMI	Y.113-2 Sur T/NOCHE	OXIGENO (O ₂) 19.5%	21.3%
HORA	8:15 pm	MONOXIDO CARBONO (CO) 25 ppm	10 ppm
FECHA	23-08-24	DIOXIDO CARBONO (CO ₂) 5 000ppm	2600 ppm
DIRECCION DE FLUJO		DIOXIDO NITROGENO (NO) 3ppm	0.0ppm







FORMATO IPERC CONTINUO

Código: KLEF-FO-SSO-08
Versión: V-01
Fecha: 02/02/2024
Página 1 de 1

SEVERIDAD	MATRIZ DE EVALUACIÓN DE RIESGOS					
Catastrófico	1	1	2	4	7	11
Fatalidad	2	3	5	8	12	16
Permanente	3	6	9	13	17	20
Temporal	4	10	14	18	21	23
Menor	5	15	19	22	24	25
		A	B	C	D	E
		Común	Ha sucedido	Podría suceder	Raro que suceda	Prácticamente imposible que suceda
		FRECUENCIA				

NIVEL DE RIESGO	DESCRIPCIÓN	PLAZO DE CORRECCIÓN
ALTO	Riesgo intolerable, requiere controles inmediatos. Si no se puede controlar PELIGRO se paraliza los trabajos operacionales en la labor.	0-24 HORAS
MEDIO	Iniciar medidas para eliminar/reducir el riesgo. Evaluar si la acción se puede ejecutar de manera inmediata	0-72 HORAS
BAJO	Este riesgo puede ser tolerable	1 MES

TAREA

DATOS DE LOS TRABAJADORES

FECHA	HORA	LABOR / NIVEL / ZONA	NOMBRES Y APELLIDOS	CARGO	FIRMA
13/03/24	8:00am	Mina / 025	Jose Luis Meza Callapiña	Mecánico	

IPERC CONTINUO

DESCRIPCIÓN DEL PELIGRO	CONSECUENCIA (RIESGO)	EVALUACIÓN IPERC			MEDIDAS DE CONTROL A IMPLEMENTAR	EVALUACIÓN RIESGO RESIDUAL		
		A	M	B		A	M	B
Ruido del equipo	Exposición al ruido, sordera		13		Uso correcto de tapones y orejeras de oído.			17
Presencia de CO2	Gaseamiento y/o Asfixia		8		Implementar compresora de aire en el taller 025.			12
Equipo en movimiento	Atropello y/o colisión		8		Comunicación constante mediante sonidos y luces.			12
Manipulación de herramientas	Cortes, golpes y/o fracturas		13		Inspección rigurosa del estado de las herramientas.			17
Rocas sueltas	tropiezos y/o Aplastamiento		8		Un correcto sostenimiento y limpieza del area de trabajo			12

SECUENCIA PARA CONTROLAR EL PELIGRO Y REDUCIR EL RIESGO:

1. Implementar compresora de aire en el taller 025.
2. Un correcto sostenimiento y limpieza del area de trabajo.
3. Comunicación constante mediante sonido y luces.
4. Inspeccion rigurosa del estado de las herramientas.
5. Uso correcto de tapones y orejeras de oído.

DATOS DE LOS SUPERVISORES:

HORA	NOMBRE SUPERVISOR	MEDIDA CORRECTIVA	FIRMA

NOTA: Eliminar Peligros, as Tarea Prioritaria, antes de Iniciar las Operaciones Diarias