



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE MANTENIMIENTO DE LA  
PLANTA GEOTÉRMICA ORZUNIL 1**

**Joaquín Antonio Reinoso Díaz**

Asesorado por Ingeniero Carlos Aníbal Chicojay Coloma

Guatemala, abril 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE MANTENIMIENTO DE LA  
PLANTA GEOTÉRMICA ORZUNIL 1**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JOAQUÍN ANTONIO REINOSO DÍAZ**

ASESORADO POR INGENIERO CARLOS ANÍBAL CHICOJAY COLOMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, ABRIL 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

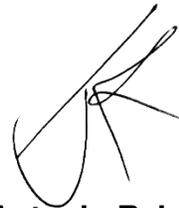
DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortíz
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE MANTENIMIENTO DE LA PLANTA GEOTÉRMICA ORZUNIL 1**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 15 de mayo de 2023.



**Joaquín Antonio Reinoso Díaz**



Guatemala, 29 de enero de 2024  
REF.EPS.DOC.29.01.2024

Ingeniero  
Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ing. Argueta Hernández:

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S.) del estudiante universitario de la Carrera de Ingeniería Mecánica, **JOAQUÍN ANTONIO REINOSO DÍAZ, Registro Académico No. 201900143**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE MANTENIMIENTO DE LA PLANTA GEOTÉRMICA ORZUNIL 1.**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Carlos Anibal Chicojay Coloma  
**Asesor-Supervisor de EPS**  
Área de Ingeniería Mecánica



CACHC/cch



Guatemala, 29 de enero de 2024  
REF.EPS.DOC.29.01.2024

Ingeniero  
Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ing. Argueta Hernández:

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S.) del estudiante universitario de la Carrera de Ingeniería Mecánica, **JOAQUÍN ANTONIO REINOSO DÍAZ, Registro Académico No. 201900143**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE MANTENIMIENTO DE LA PLANTA GEOTÉRMICA ORZUNIL 1.**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Carlos Anibal Chicojay Coloma  
**Asesor-Supervisor de EPS**  
Área de Ingeniería Mecánica



CACHC/cch

Universidad de San Carlos de  
Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Unidad de EPS

Guatemala, 07 de febrero de 2024  
REF.EPS.D.12.02.2024

Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Morales Baiza:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE MANTENIMIENTO DE LA PLANTA GEOTÉRMICA ORZUNIL 1**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Joaquín Antonio Reinoso Díaz** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Carlos Anibal Chicojay Coloma.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS

OAH/ra



Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.046.2024

El Revisor de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor-Supervisor y del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE MANTENIMIENTO DE LA PLANTA GEOTÉRMICA ORZUNIL 1** de la estudiante **JOAQUIN ANTONIO REINOSO DÍAZ, CUI 2071302210901, registro académico 201900143** y habiendo realizado la revisión de Escuela, se autoriza para que continúe su trámite en la oficina de Lingüística, Unidad de Planificación.

*"Id y enseñad a todos"*



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
Revisor – Área Complementaria  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, marzo de 2024  
/aej

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

SIST.LNG.DIRECTOR.11.EIM.2024

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de área, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE MANTENIMIENTO DE LA PLANTA GEOTÉRMICA ORZUNIL 1**, presentado por: **Joaquín Antonio Reinoso Díaz**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ingeniero Gilberto Enrique Morales Baiza  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, marzo de 2024



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato  
Facultad e Ingeniería

24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.155.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE MANTENIMIENTO DE LA PLANTA GEOTÉRMICA ORZUNIL 1**, presentado por: **Joaquín Antonio Reinoso Díaz** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. José Francisco Gómez Rivera  
Decano a.i.



Guatemala, abril de 2024

Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2024 Correlativo: 155 CUI: 2071302210901

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Mis padres**

Por sus sacrificios, enseñanzas, creer en mí y apoyarme en todo momento.

**Mi hermano**

Por su apoyo en todo momento y ser ejemplo para seguir y cumplir nuevas metas.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por la vida que me ha dado y las oportunidades que me ha dado.
<b>Mi madre</b>	Por sus sacrificios, amor y constante apoyo
<b>Mi hermano</b>	Por su apoyo en todo momento y ser ejemplo para seguir y cumplir metas nuevas.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por brindarme la oportunidad de superarme integralmente y ser parte de.
<b>Ing. Pablo Catalán</b>	Por su apoyo, enseñanzas, confianza y amistad
<b>Mis amigos</b>	Por su constante apoyo y deseo de superación
<b>Ingenieros</b>	Por haber compartido sus conocimientos y motivarme a seguir adelante
<b>Orzunil 1</b>	Por haberme recibido y confiar en mí para realizar este proyecto



# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS .....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Descripción de la empresa .....	1
1.1.1. Misión .....	2
1.1.2. Valores.....	2
1.1.3. Historia.....	3
1.1.4. Ubicación .....	4
1.2. Actividad principal.....	5
1.2.1. Energía geotérmica.....	6
1.2.2. Central geotérmica.....	6
1.2.3. Funcionamiento general de una planta geotérmica.....	7
1.3. Descripción del problema .....	8
1.3.1. Antecedentes .....	8
1.3.2. Justificación .....	9
1.3.3. Definición y delimitación del problema .....	10
1.3.3.1. Definición .....	10
1.3.3.2. Delimitación .....	10

2.	FASE DE INVESTIGACIÓN. AHORRO DE ENERGÍA A TRAVÉS DE PROPUESTA DE MEJORA DE COMPRESOR .....	13
2.1.	Generalidades de sistemas neumáticos .....	13
2.2.	Requerimiento de aire comprimido .....	13
2.3.	Sistema de aire comprimido actual.....	13
2.4.	Compresor de aire .....	14
2.5.	Mediciones de compresor .....	16
2.6.	Consumo de energía y costo.....	17
2.7.	Consumo de energía y costo nominal .....	19
2.8.	Compresor de aire sugerido .....	21
2.9.	Consumo de energía y costo de compresor sugerido .....	22
2.10.	Elaboración de la proyección de costos energéticos y monetarios entre el compresor actual y el compresor sugerido .....	24
3.	FASE DE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE MANTENIMIENTO .....	27
3.1.	Situación previa de mantenimiento.....	27
3.2.	Situación actual de mantenimiento .....	27
3.3.	Orden de trabajo .....	29
3.3.1.	Orden de trabajo correctiva .....	29
3.3.1.1.	Zona de la orden que cumplimenta el Solicitante .....	29
3.3.1.2.	Zona de la orden que cumplimenta el ejecutante .....	32
3.3.2.	Indicadores de gestión de órdenes de trabajo .....	34
3.3.2.1.	Número de órdenes de trabajo generadas en un período determinado	34
3.4.	Gestión de la información asistido por ordenador (GMAO) .....	35

3.4.1.	Objetivos que se pretenden con la informatización	36
3.4.2.	Proceso de implementación	38
3.4.2.1.	Análisis de equipos	38
3.4.2.2.	Lista de equipos	39
3.4.2.3.	Carga de los equipos en el sistema	42
3.4.2.3.1.	Power Apps	42
3.4.2.3.2.	Creación de documentos personalizados	44
3.4.3.	Interfaz del encargado de área	45
3.4.3.1.	Pantalla de inicio	46
3.4.3.2.	Creación de nuevo registro	47
3.4.3.3.	Búsqueda de registros	49
3.4.3.4.	Detalle de registros	50
3.4.4.	Interfaz del gerente de mantenimiento	53
3.4.4.1.	Pantalla de inicio	53
3.4.4.2.	Búsqueda de registros	54
3.4.4.3.	Detalle de registros	55
3.4.4.4.	Edición de registros	57
4.	FASE DE DOCENCIA. CAPACITACIÓN DEL PERSONAL SOBRE EL CONTROL DE MANTENIMIENTO	59
4.1.	Capacitación inicial	59
4.2.	Capacitación específica por área	60
4.3.	Capacitación del gerente de mantenimiento	62
4.4.	Retroalimentación y experiencia de los usuarios	62
4.5.	Beneficios en el rendimiento de mantenimiento	62

CONCLUSIONES ..... 65  
RECOMENDACIONES ..... 67  
REFERENCIAS..... 69  
APÉNDICES ..... 71  
ANEXOS ..... 79

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Ubicación planta geotérmica Orzunil 1 .....	5
<b>Figura 2.</b>	Especificaciones técnicas de compresor.....	22
<b>Figura 3.</b>	Estructura arbórea .....	40
<b>Figura 4.</b>	Estructura arbórea de control de mantenimiento.....	42
<b>Figura 5.</b>	Pantalla inicio... ..	46
<b>Figura 6.</b>	Pantalla de nuevo registro .....	49
<b>Figura 7.</b>	Pantalla de búsqueda de registros.....	50
<b>Figura 8.</b>	Pantalla de detalle .....	52
<b>Figura 9.</b>	Pantalla inicio... ..	53
<b>Figura 10.</b>	Pantalla de búsqueda de registros.....	54
<b>Figura 11.</b>	Pantalla de detalle .....	56
<b>Figura 12.</b>	Pantalla de edición de registros .....	58
<b>Figura 13.</b>	Capacitación inicial .....	60
<b>Figura 14.</b>	Capacitación por área.....	61

## TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Mediciones de voltaje y amperaje de compresor actual .....	16
<b>Tabla 2.</b>	Cálculo de costo de energía de compresor actual .....	19
<b>Tabla 3.</b>	Cálculo de costo de energía nominal de compresor actual por día .....	20
<b>Tabla 4.</b>	Cálculo de costo de energía nominal por día de compresor sugerido.....	24

<b>Tabla 5.</b>	Proyección de ahorro energético y monetario de compresor actual versus compresor sugerido .....	25
<b>Tabla 6.</b>	Orden de trabajo de Orzunil 1 .....	31
<b>Tabla 7.</b>	Ejemplo de equipos y sistemas del control de mantenimiento .....	44

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista
<b>A</b>	Amperios
<b>fp</b>	Factor de potencia
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>INDE</b>	Instituto Nacional de Electrificación
<b>Km</b>	Kilómetro
<b>KW</b>	Kilowatts
<b>PSI</b>	Libra por pulgada cuadrada
<b>MW</b>	Megawatts
<b>CFM</b>	Pies cúbicos por minuto
<b>%</b>	Porcentaje
<b>Q.</b>	Quetzales
<b>V</b>	Voltios



## GLOSARIO

<b>Ahorro energético</b>	Reducción del consumo de energía eléctrica o combustible, lo que resulta en una disminución de los costos operativos y una huella ambiental más baja.
<b>Auditoría energética</b>	Evaluación exhaustiva de los procesos y sistemas de una planta con el objetivo de identificar áreas de mejora en el consumo de energía.
<b>Capacitación</b>	Proceso de formación y desarrollo de habilidades del personal para mejorar su comprensión y competencia en el uso de nuevas tecnologías o herramientas.
<b>GMAO</b>	Gestión de Mantenimiento Asistido por Computadora: Sistema informático que ayuda en la planificación, seguimiento y gestión de actividades de mantenimiento en una planta industrial.
<b>OEC</b>	Convertor de energía Ormat ( <i>Ormat Energy Converter</i> )
<b>Optimización de carga</b>	Distribución eficiente de la carga de trabajo entre varios equipos o sistemas para mejorar el rendimiento y la eficiencia energética.

<b>Planta Geotérmica</b>	Instalación que utiliza la energía geotérmica para generar electricidad o calor a través de la extracción y aprovechamiento del calor de la Tierra.
<b>Reservorio</b>	Es una zona de roca fracturada y permeable que se calienta con la fuente de calor y permite que el fluido geotermal circule a través de él adquiriendo el calor.
<b>SharePoint</b>	Las organizaciones usan Microsoft SharePoint para crear sitios web. Se puede usar como un lugar seguro donde almacenar, organizar y compartir información desde cualquier dispositivo, así como acceder a ella.
<b>Sistema de Control de Mantenimiento</b>	Plataforma o programa informático diseñado para administrar y optimizar las operaciones de mantenimiento en una instalación.
<b>Velocidad Variable</b>	Capacidad de ajustar la velocidad de funcionamiento de un equipo, como un compresor, según las necesidades, lo que puede resultar en un menor consumo de energía.

## **RESUMEN**

El ejercicio profesional supervisado en la central geotérmica Orzunil 1 abarcará dos áreas fundamentales: mantenimiento y producción.

En el área de producción, se llevará a cabo un estudio destinado a mejorar el sistema de aire comprimido. Este estudio comprenderá la identificación de los equipos que componen el sistema de aire comprimido y la realización de mediciones de consumo energético.

El objetivo es recopilar datos que permitan proponer mejoras en el sistema actual de aire comprimido. Estas mejoras no solo conducirán a un ahorro significativo de energía, sino también a una reducción de costos operativos.

Por otro lado, en el área de mantenimiento, se llevarán a cabo intervenciones para optimizar el proceso de mantenimiento de los equipos de la central geotérmica. Se establecerá un sistema de control de mantenimiento que abarcará todas las áreas de la planta, incluyendo la mecánica, electricidad e instrumentación. Este sistema de control de mantenimiento se implementará de manera computarizada, lo que proporcionará a los responsables de cada área un archivo digitalizado con información relevante sobre los mantenimientos realizados en la planta. Además, permitirá el análisis de datos para identificar oportunidades de mejora en el área de mantenimiento de la central geotérmica Orzunil 1.

Este ejercicio profesional supervisado tiene como objetivo principal la optimización de la eficiencia energética y la gestión del mantenimiento en la planta geotérmica, contribuyendo así a la mejora continua de sus operaciones.

# OBJETIVOS

## General

Implementar un Sistema de Gestión de Mantenimiento Asistido por Computadora (GMAO) en la planta geotérmica Orzunil 1.

## Específicos

1. Identificar áreas de mejora en el sistema de aire comprimido de Orzunil 1 con el objetivo de optimizar el consumo energético.
2. Diseñar e implementar un Sistema de Control de Mantenimiento informatizado en todas las áreas de la planta geotérmica Orzunil 1.
3. Proporcionar capacitación a los colaboradores que utilizarán el Sistema de Control de Mantenimiento, asegurando una correcta comprensión y aplicación de la herramienta.



## INTRODUCCIÓN

Guatemala, con su vasto potencial geotérmico, se destaca como un país pionero en la explotación de energía renovable. Entre sus proyectos emblemáticos se encuentra la central geotérmica Orzunil 1, estratégicamente ubicada en el municipio de Zunil, en el departamento de Quetzaltenango. Esta central, impulsada por la riqueza del recurso geotérmico en la región, se erige como un contribuyente clave en la generación de energía eléctrica para la red nacional.

Orzunil 1 ha establecido una colaboración crucial con el Instituto Nacional de Electrificación (INDE) para la utilización de los valiosos pozos geotérmicos. Esta asociación no solo representa un compromiso con la sostenibilidad energética, sino que también resalta la importancia de aprovechar los recursos naturales de manera responsable.

Sin embargo, para mantener su operatividad y eficiencia, Orzunil 1 depende en gran medida de la gestión efectiva de su complejo sistema de componentes mecánicos, eléctricos, de control, neumáticos y otros sistemas. El mantenimiento adecuado de estos elementos es esencial para garantizar un funcionamiento ininterrumpido y un aporte continuo a la producción de energía eléctrica.

Este proyecto de Ejercicio Profesional Supervisado se sumerge en la realidad de Orzunil 1, explorando los desafíos y oportunidades que surgen en la gestión de esta central geotérmica. A lo largo del documento, se abordarán aspectos clave relacionados con la implementación de un Sistema de Gestión de

Mantenimiento Asistido por Computadora (GMAO) y la mejora de la eficiencia energética en el contexto de esta planta emblemática.

# 1. GENERALIDADES

## 1.1. Descripción de la empresa

En cuanto a, Orzunil 1 es una central geotérmica ubicada en el municipio de Zunil del departamento de Quetzaltenango que aprovecha el recurso geotérmico, convirtiendo la energía geotérmica en electricidad que se distribuye a la red nacional. Orzunil 1 tiene un convenio con el INDE para el uso de los pozos geotérmicos (Trigueros, 2017).

En cuanto a, la planta geotérmica Orzunil 1, (Trigueros, 2017) inició operaciones desde 1999, la planta cuenta con 6 pozos, 8 generadores y 8 turbinas para la conversión de energía. La planta genera actualmente un promedio de 17 MW.

El vapor extraído de los campos geotérmicos de Zunil es vapor de alta entalpía (vapor con temperaturas por encima de 150°C, ideal para generación eléctrica) sin embargo contiene altas cantidades de sílica y azufre, entre otras sustancias, que hacen imposible introducirlo directamente a la turbina para generar electricidad, por lo que se trabaja con un ciclo binario que consiste en transferir el calor del vapor de agua extraído del campo geotérmico a otro fluido, llamado fluido secundario o fluido de trabajo, con características especiales, que es inocuo para la turbina (Trigueros, 2017).

### **1.1.1. Misión**

“En Ormat, nuestra misión es clara: queremos convertirnos en un proveedor global líder de energía renovable, mientras desarrollamos una cartera geográficamente equilibrada de energía geotérmica, energía recuperada e instalaciones de almacenamiento” (Ormat [O], 2023).

### **1.1.2. Valores**

Los valores de la empresa direccionan como trabajar, dentro de ella expresa los valores de esta forma Ormat (2023):

- Estabilidad: define a nuestro personal, tecnologías, productos, desempeño de las instalaciones y nuestra firme base financiera.
- Renovación constante: buscamos continuamente nuevos desafíos, avanzar en nuevas tecnologías, ingresar en nuevos ámbitos profesionales y probar nuevos modelos comerciales.
- Compromiso total: estamos totalmente comprometidos con nuestros accionistas y con la construcción de un futuro sostenible.
- Coraje: actuamos con la certeza basada en el conocimiento, la experiencia, la administración prudente de riesgos y un enfoque

firme sobre la entrega de los mejores resultados para nuestros clientes.

- Creatividad: entendemos y apreciamos totalmente la peculiaridad de cada uno de los clientes a los cuales ofrecemos nuestros servicios, y la función vital que desempeña la creatividad para encontrar las soluciones adecuadas. (párr.3)

### **1.1.3. Historia**

La historia de Ormat en el campo de energías renovables ha sido recopilada por Trigueros (2017):

Ormat se ha especializado en el aprovechamiento de la energía renovable de la naturaleza durante más de cinco décadas.

Ormat fue fundada en 1965 por la familia Bronicki, que desarrolló una visión audaz para exportar tecnología innovadora en el ámbito de la energía renovable.

En aquel momento, Ormat era conocida principalmente como un pionero de diseños patentados de turbinas, capaces de generar electricidad a partir de recursos energéticos de baja entalpía. En sus

primeros años, Ormat se orientó exclusivamente a la fabricación de equipos de generación de energía.

Desde los inicios de Ormat, nuestros sólidos valores han guiado y formado nuestra modalidad de trabajo, nuestras relaciones con empleados, clientes, comunidades y otras partes interesadas, así como el nivel de profesionalismo y espíritu de innovación que acompaña a cada producto y servicio de energía renovable que ofrecemos.

La energía renovable y la visión de un futuro más limpio y sostenible nos han guiado hasta el presente, y creemos que nuestra visión, capacidades y experiencia permitirán que Ormat continúe floreciendo por generaciones” (párr.4).

#### **1.1.4. Ubicación**

La planta geotérmica Orzunil 1 está ubicada en el km 210 Aldea La Calera 09001, Quetzaltenango, Guatemala.

## Figura 1.

### Ubicación planta geotérmica Orzunil 1



*Nota.* Ubicación de la planta geotérmica Orzunil 1. Obtenido de Google Maps (2023). <https://www.google.com/maps> , consultado el 20 de marzo de 2023. De dominio público.

## 1.2. Actividad principal

La energía geotérmica aprovecha el calor del subsuelo o la corteza terrestre, siendo su aplicación determinada por la temperatura. Las centrales geotérmicas son las encargadas de convertir esta energía en electricidad, operando mediante la generación de vapor a partir del calor terrestre que impulsa turbinas conectadas a generadores eléctricos. El proceso incluye la perforación de pozos en reservorios geotérmicos, la extracción del agua o vapor caliente hacia la superficie, su expansión para mover turbinas y la posterior entrega de la

electricidad a través de líneas de transmisión. Una vez utilizado, el agua o vapor se enfría y retorna al reservorio para ser recalentado y reutilizado, constituyendo así el funcionamiento general de una planta geotérmica (Planas, 2019).

### **1.2.1. Energía geotérmica**

La energía geotérmica descrita por Westreicher (2022):

La energía geotérmica es aquella que tiene como fuente el calor proveniente del subsuelo o del interior de la corteza terrestre.

El uso que pueda darse a esta clase de energía dependerá de su temperatura. Cuando es alta, de entre 120 °C y 180 °C (aunque esta referencia es arbitraria y varía según la fuente consultada), puede aprovecharse para la generación de electricidad a nivel residencial e industrial. Sin embargo, a menor temperatura, su uso más apropiado es para sistemas de calefacción de uso doméstico. (párr.2)

### **1.2.2. Central geotérmica**

“Las centrales geotérmicas son las plantas encargadas de convertir la energía geotérmica en electricidad. Una central geotérmica es una instalación donde se genera electricidad mediante el calor de la Tierra” (Planas, 2019).

### **1.2.3. Funcionamiento general de una planta geotérmica**

Una planta geotérmica funciona utilizando el calor de la Tierra para producir vapor que mueve una turbina y genera electricidad. Estos son los pasos básicos que describe Planas (2019):

- Se perforan pozos en un reservorio geotérmico conocido, donde se encuentra agua o vapor caliente bajo tierra.
- El agua o vapor caliente se lleva a la superficie a través de tuberías y se envía a una planta eléctrica.
- El agua o vapor caliente, o un fluido de trabajo secundario, se deja expandir rápidamente y girar una turbina que está conectada a un generador eléctrico.
- La electricidad se envía a las líneas de transmisión y se entrega a hogares y negocios.
- El agua o vapor usado se enfría y se inyecta de nuevo en el reservorio para ser calentado y reutilizado. (párr.5)

### **1.3. Descripción del problema**

La planta geotérmica Orzunil 1 la ausencia de un registro sistemático de actividades de mantenimiento correctivo ha creado una brecha en la gestión del proceso, destacando la necesidad de un sistema más estructurado y eficiente. La dependencia en un checklist y la memoria humana ha demostrado ser propensa a errores y lenta en la toma de decisiones, lo que subraya la urgencia de implementar un sistema de control integral.

#### **1.3.1. Antecedentes**

Desde su inicio en 1999, la planta geotérmica Orzunil 1 ha sido un pilar esencial en la generación de energía en Guatemala. Equipada con 6 pozos, 8 generadores y 8 turbinas dedicadas a la conversión de energía, esta planta ha mantenido una producción constante, promediando actualmente 17 megavatios (MW) de energía eléctrica.

Uno de los enfoques operativos de Orzunil 1 ha sido la implementación del mantenimiento preventivo, una estrategia esencial para garantizar la continuidad y confiabilidad de sus equipos. Sin embargo, durante las inspecciones rutinarias de mantenimiento preventivo, los técnicos a menudo han identificado diferentes tipos de fallas en el proceso. Estas fallas, una vez identificadas, requieren intervenciones inmediatas para su corrección, lo que se conoce como mantenimiento correctivo.

Lamentablemente, el registro sistemático de estas actividades de mantenimiento correctivo ha sido un desafío persistente. La ausencia de un sistema de control efectivo ha llevado a una falta de seguimiento y documentación adecuada de las acciones realizadas en respuesta a las fallas

identificadas. Esta carencia de registro ha creado una brecha en la gestión de los procesos de mantenimiento, lo que subraya la necesidad de implementar un sistema de gestión más estructurado y eficiente.

### **1.3.2. Justificación**

La planta geotérmica Orzunil 1, a pesar de su larga trayectoria en la generación de energía, se enfrenta a una limitación crítica: la carencia de un sistema de control de mantenimiento efectivo. Actualmente, la gestión del mantenimiento se basa en un sencillo checklist utilizado para el mantenimiento preventivo. Esta ausencia de un control más integral significa que gran parte de la información necesaria para tomar decisiones fundamentales sobre repuestos o la dirección del mantenimiento se encuentra dispersa en la memoria de los encargados de área.

Esta dependencia en la memoria humana no solo es propensa a errores, sino que también conlleva la ineficiencia de tiempo. Las decisiones estratégicas relacionadas con el mantenimiento pueden demorarse significativamente debido a la falta de un sistema centralizado que proporcione acceso inmediato a datos relevantes de cada mantenimiento realizado.

La implementación de un sistema de control de mantenimiento abordará esta problemática de raíz. Al contar con un control integral, los encargados de área y el gerente de mantenimiento tendrán la capacidad de analizar datos concretos de manera rápida y efectiva. Esto no solo agilizará la toma de decisiones, sino que también permitirá identificar y abordar problemas de manera más proactiva, lo que a su vez se traducirá en un ahorro significativo de tiempo y costos operativos.

En resumen, la introducción de un sistema de control de mantenimiento en la planta geotérmica Orzunil 1 no solo mejorará la eficiencia y la confiabilidad de las operaciones, sino que también posicionará a la planta para enfrentar los desafíos futuros de manera más efectiva en un sector energético en constante evolución.

### **1.3.3. Definición y delimitación del problema**

El control de mantenimiento en la planta geotérmica Orzunil 1 se define como un sistema integral destinado a mejorar la eficiencia y confiabilidad de las unidades de conversión de energía, abordando las deficiencias actuales en su gestión para agilizar la toma de decisiones y reducir costos operativos mediante un análisis efectivo de datos específicos.

#### **1.3.3.1. Definición**

El control de mantenimiento se refiere a un sistema integral de gestión que se implementará en la planta geotérmica Orzunil 1 con el propósito de optimizar la eficiencia y la confiabilidad de las unidades de conversión de energía. Este sistema está diseñado para abordar las deficiencias actuales en la gestión del mantenimiento, agilizando la toma de decisiones y reduciendo los costos operativos al permitir un análisis efectivo de datos específicos relacionados con equipos y componentes específicos.

#### **1.3.3.2. Delimitación**

El control de mantenimiento se delimita de la siguiente manera:

- **Áreas Incluidas:** el control de mantenimiento se centra exclusivamente en las unidades de conversión de energía en la planta geotérmica Orzunil 1. Estas unidades comprenden sistemas de lubricación, valvulería neumática, bombas, instrumentación, equipos auxiliares de las unidades, generadores, turbinas y otros componentes relacionados con la conversión de energía.
- **Tecnología Patentada:** el control de mantenimiento se limita a equipos o partes de equipos que contienen tecnología patentada de Ormat Technologies, Inc. Esto asegura un enfoque específico en los componentes más críticos y sofisticados de la planta.

Este enfoque estratégico en las unidades de conversión de energía y la tecnología patentada permitirá una gestión de mantenimiento eficaz y precisa que contribuirá directamente a la mejora de la eficiencia y la reducción de costos operativos en Orzunil 1.



## **2. FASE DE INVESTIGACIÓN. AHORRO DE ENERGÍA A TRAVÉS DE PROPUESTA DE MEJORA DE COMPRESOR**

### **2.1. Generalidades de sistemas neumáticos**

Los sistemas neumáticos para la producción y distribución de aire comprimido de calidad tienen una importancia vital, y no sólo en el ámbito de la industria o de la construcción, sino también en el sector de la automoción, con aplicaciones muy diversas como la apertura neumática de puertas en autobuses, o el accionamiento del sistema neumático de frenos o la suspensión neumática de vehículos industriales o de gran tonelaje.

### **2.2. Requerimiento de aire comprimido**

La planta Orzunil 1 tiene una demanda total de 200 CFM de aire comprimido, como se detalla en el Anexo 1.

### **2.3. Sistema de aire comprimido actual**

El sistema de aire comprimido actual consta de los siguientes componentes:

- Dos compresores rotativos de tornillo de 75 KW con una capacidad de 477 CFM cada uno.
- Dos secadoras refrigerantes

- Separador de aceite-agua
- Tanque de almacenamiento de 500 litros
- Filtro de aire comprimido

#### **2.4. Compresor de aire**

Los compresores son dispositivos fundamentales en una amplia gama de aplicaciones industriales y comerciales, ya que desempeñan el papel crucial de elevar la presión del aire para diversos usos, como el accionamiento de herramientas, máquinas, sistemas de control y medición, así como la alimentación de válvulas y otros dispositivos.

Existen dos categorías principales de compresores en función de los principios termodinámicos que aplican como describe Rodríguez (2023):

- **Compresores de Desplazamiento Positivo:** estos compresores confinan el aire en un espacio interior y luego reducen dicho espacio, aumentando así la presión del aire contenido. Dentro de esta categoría, los compresores de tornillo destacan por su eficacia. Estos compresores utilizan dos rotores en forma de tornillo que giran en sentido contrario uno al otro. A medida que estos rotores rotan, el espacio entre ellos disminuye gradualmente, lo que resulta en una compresión del aire. La relación de presión obtenida depende de la geometría de los rotores y del diseño del difusor. Los

compresores de tornillo se valoran por su funcionamiento silencioso y su capacidad para proporcionar un flujo constante y continuo de aire.

- Compresores Dinámicos o Turbocompresores: en esta categoría, los compresores utilizan álabes que giran a alta velocidad para aumentar la velocidad del aire, que luego pasa a través de un difusor donde su velocidad se reduce bruscamente, convirtiendo la energía cinética en presión estática. Aunque estos compresores son capaces de proporcionar un alto caudal de aire, suelen operar a presiones más moderadas en comparación con los compresores de desplazamiento positivo.
- Los compresores de tornillo, en particular, están ganando popularidad en comparación con los compresores alternativos de pistón debido a varias ventajas. Estos compresores funcionan de manera silenciosa, lo que los hace adecuados para entornos sensibles al ruido. Además, ofrecen un suministro de aire continuo y son altamente fiables en su funcionamiento.

Es importante destacar que algunos compresores de tornillo pueden utilizar lubricantes para lograr relaciones de compresión más altas.

Sin embargo, esto puede afectar la eficiencia y la calidad del aire comprimido, ya que el aceite o lubricante puede contaminar el aire resultante. Por lo tanto, la elección entre compresores de tornillo lubricados o libres de aceite dependerá de las necesidades específicas de la aplicación y la prioridad dada a la eficiencia y la pureza del aire comprimido.

## 2.5. Mediciones de compresor

Con el fin de evaluar y cuantificar el consumo de energía de los compresores, se llevó a cabo un proceso de medición. Este proceso se basó en la utilización de un instrumento de precisión altamente confiable: el multímetro Fluke 376 FC.

**Tabla 1.**

*Mediciones de voltaje y amperaje de compresor actual*

Fecha	Amperios (A)	Voltios (V)
5-Jun	66	487
6-Jun	60	488
7-Jun	66	487
8-Jun	62	492
9-Jun	64	486
10-Jun	66	486
11-Jun	68	488

*Nota.* Detalle de las mediciones que se realizaron al compresor. Elaboración propia, realizada con Excel.

## **2.6. Consumo de energía y costo**

Para determinar el costo del consumo de energía por día y obtener un total acumulado por semana, se implementó un proceso de cálculo. Este proceso se diseñó de manera que brindara una visión del gasto energético asociado a las operaciones diarias y semanales.

El cálculo comenzó mediante la recopilación de los datos de consumo de energía proporcionados por las mediciones realizadas con anterioridad. Estos datos incluyeron mediciones de corriente y voltaje, y se utilizaron como punto de partida para evaluar el gasto eléctrico de los compresores en un período de 24 horas.

A continuación, se aplicaron las tarifas eléctricas vigentes para determinar el costo por unidad de energía consumida. Estas tarifas pueden variar según el proveedor de energía y la región, y se consideraron en el cálculo para reflejar con los costos.

El proceso de cálculo se repitió para cada día de la semana en estudio, y los costos diarios se acumularon para obtener el costo total por semana. Esta aproximación proporcionó una comprensión integral de los costos de energía asociados a la operación continua de los compresores durante una semana completa.

Este enfoque detallado no solo permitió una evaluación precisa de los gastos de energía, sino que también brindó información valiosa para la gestión de recursos y la planificación financiera, lo que facilita la toma de decisiones informadas y estratégicas en relación con la eficiencia operativa y el control de costos.

- Cálculo de KW:

$$KW = A * V * \sqrt{3} * fp$$

Donde:

*KW = Kilowatts*

*A = Amperios*

*V = Voltios*

*fp = Factor de potencia (0.89)*

- Cálculo de Costo

$$Costo = KW * P * D$$

Donde:

*Costo = (Q.)*

*P = precio de energía en aldea La Calera (Q.2.46)*

*D = 24 horas*

**Tabla 2.**

*Cálculo de costo de energía de compresor actual*

Fecha	Amperios	Voltios	KW	Costo (Q.)
5-Jun	66	487	50	Q 2,924.10
6-Jun	60	488	45	Q 2,679.24
7-Jun	66	487	50	Q 2,936.57
8-Jun	62	492	47	Q 2,790.79
9-Jun	64	486	48	Q 2,828.73
10-Jun	66	486	49	Q 2,916.29
11-Jun	68	488	51	Q 3,004.34
			340	Q 20,080.05

*Nota.* Detalle del costo del consumo de energía del compresor que se utiliza actualmente. Elaboración propia, realizada con Excel.

## **2.7. Consumo de energía y costo nominal**

Para calcular con precisión el costo de consumo nominal por día, se recurrió a la información proporcionada en el manual del compresor actual, que especificaba la potencia nominal del equipo. Esta potencia nominal es un dato esencial, ya que representa la cantidad de energía que el compresor se espera que consuma en condiciones normales de funcionamiento durante un período de tiempo.

El proceso de cálculo se llevó a cabo meticulosamente, tomando en consideración la potencia nominal del compresor y extrapolándola para abarcar un período de 24 horas. Esto implicó dividir la potencia nominal por la cantidad de horas en un día, es decir, 24 horas, para determinar la potencia consumida por el compresor en una hora típica de funcionamiento.

A continuación, se multiplicó la potencia por hora por 24 para obtener el consumo total de energía en un día completo. Este valor representó el costo de consumo nominal diario del compresor.

Este enfoque de cálculo se basó en las especificaciones proporcionadas por el fabricante del compresor y permitió obtener una estimación precisa del gasto energético que se esperaría en condiciones ideales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el rendimiento real del compresor puede variar según factores como las condiciones de operación y el mantenimiento. A pesar de ello, esta estimación del consumo nominal proporcionó una base sólida para la evaluación y la gestión de los costos operativos asociados al compresor.

$$\text{Costo} = KW * D * P$$

Donde:

*KW = Kilowatts*

*D = 24 horas*

*P = precio de energía en aldea La Calera (Q.2.46)*

**Tabla 3.**

*Cálculo de costo de energía nominal de compresor actual por día*

Costo nominal	
Potencia (KW)	Costo (Q.)
75	Q 4,428.00

*Nota.* Detalle del costo del consumo de energía nominal del compresor que se utiliza actualmente. Elaboración propia, realizado con Excel.

## **2.8. Compresor de aire sugerido**

En respuesta a los requerimientos de la planta actual, que demandaba un suministro de 200 CFM de aire comprimido a una presión constante de 125 psi, se consideró proactivamente la futura expansión de la planta. En este sentido, se incrementó la capacidad prevista en un 20 % para acomodar posibles adiciones de equipos. Como resultado, la cantidad requerida de CFM de aire comprimido se ajustó a 240 CFM manteniendo la presión de 125 psi como estándar.

La recomendación de compresor fue el modelo Atlas GA 37L VSD+. Este compresor rotativo de tornillo enfriado por aire cumple con los criterios requeridos y presentaba una capacidad de administrar 246 CFM a 138 psi, respaldado por una potencia de 37 KW.

La elección de esta marca de compresores se basó en la preferencia de la planta por su confiabilidad y compatibilidad con el sistema de aire comprimido existente. Implementar este compresor no requerirá cambios significativos en la configuración de la instalación actual; simplemente reemplazaría el compresor actual, manteniendo intacta la configuración existente.

Este tipo de compresor, con tecnología VSD+ (Variador de Velocidad de Frecuencia Variable), presenta una ventaja significativa en términos de eficiencia energética y costos operativos. El VSD+ permite variar la velocidad del motor en función de la demanda de aire comprimido, lo que resulta en ahorros sustanciales. Al ser capaz de operar en un rango del 20 % al 100 % de su capacidad, evita los picos de consumo al arrancar y garantiza una operación continua y eficiente, lo que se traduce en una reducción de costos de hasta un 50 %, según el fabricante.

Esta recomendación se alineó con la visión de la planta de optimizar la eficiencia operativa y reducir los costos a largo plazo, al tiempo que se garantizó la compatibilidad y la flexibilidad para futuras expansiones.

**Figura 2.**

*Especificaciones técnicas de compresor*

## Technical specifications GA 37-110 VSD+

Compressor type	Max. working pressure		Capacity FAD* (min-max)			Installed motor power		Noise level**	Weight WorkPlace	Weight WorkPlace Full Feature
	bar(e)	psig	l/s	m³/h	cfm	kW	hp	dB(A)	kg	kg
GA 37 VSD***	4	58	15-116	55-419	32-246	37	50	67	376	500
	7	102	15-115	53-413	31-243	37	50	67	376	500
	9.5	138	17-102	62-368	36-216	37	50	67	376	500
	12.5	181	16-87	59-312	35-183	37	50	67	376	500
GA 37L VSD*	4	58	26-133	94-479	55-282	37	50	67	860	1060
	7	102	26-132	93-475	55-279	37	50	67	860	1060
	9.5	138	25-116	89-418	53-246	37	50	67	860	1060
	12.5	181	38-99	138-355	81-209	37	50	67	860	1060
GA 45 VSD*	4	58	26-159	94-573	55-337	45	60	67	860	1060
	7	102	26-157	93-565	55-332	45	60	67	860	1060
	9.5	138	25-137	89-494	53-291	45	60	67	860	1060
	12.5	181	38-115	138-359	81-211	45	60	67	860	1060

*Nota.* Especificaciones técnicas de compresor GA37LVSD+. Obtenido de Atlas Copco Airpower. (2019). GA 50-150 VSD+ Horsepower Air Compressors. (<https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/united-states/documents/GA%2050-150%20Horsepower%20VSD+%20Air%20Compressors.pdf>)

consultado el 8 de junio de 2023. De dominio público.

### 2.9. Consumo de energía y costo de compresor sugerido

El proceso de cálculo del costo de consumo nominal diario se llevó a cabo, basándonos en la información proporcionada en el manual del compresor recomendado; este manual no solo especifica la potencia nominal del compresor, sino que también proporciona una guía completa para comprender su rendimiento y eficiencia.

- En primer lugar, se extrajo la potencia nominal del compresor del manual. Esta potencia nominal es un valor crítico que representa la cantidad de energía que se espera que el compresor consuma en condiciones normales de operación durante un período determinado.
- En segundo lugar, se aplicó un cálculo detallado que tuvo en cuenta el número de horas que el compresor se espera que esté en funcionamiento durante un día típico. Esto puede variar según las necesidades de la planta, pero se basó en un escenario operativo promedio.

La potencia nominal se dividió por el número de horas en un día (generalmente 24 horas) para determinar el consumo por hora del compresor.

A continuación, este valor se multiplicó por 24 para obtener el costo estimado de consumo nominal diario del compresor.

Este enfoque de cálculo se apoyó en la información precisa y detallada proporcionada en el manual del compresor sugerido, lo que garantiza que los cálculos reflejen de manera confiable el gasto energético real esperado. Estos datos son esenciales para tomar decisiones informadas sobre la gestión de costos y la eficiencia operativa, y proporcionan una base sólida para la planificación financiera a largo plazo.

$$\text{Costo} = KW * D * P$$

Donde:

*KW = Kilowatts*

*D = 24 horas*

$P$  = precio de energía en aldea La Calera (Q.2.46)

**Tabla 4.**

*Cálculo de costo de energía nominal por día de compresor sugerido*

Costo nominal	
Potencia (KW)	Costo (Q.)
37	Q 2,184.48

*Nota.* Detalle del costo del consumo de energía nominal del compresor que se sugiere. Elaboración propia, realizada con Excel.

**2.10. Elaboración de la proyección de costos energéticos y monetarios entre el compresor actual y el compresor sugerido**

La proyección del costo energético y financiero entre el compresor actual y el compresor recomendado se llevó a cabo mediante un proceso meticuloso y detallado. El objetivo principal de esta proyección es evaluar y comparar el impacto económico y energético de ambas opciones para tomar una decisión informada.

- Cálculo de costo de energía de compresor actual:

$$CA = EA * P$$

Donde:

$CA$  = Costo actual

$EA$  = Energía consumida por año

$P = \text{precio de kWh en aldea La Calera (Q.2.46)}$

- Cálculo de energía nominal por año:

$$CP = EN * P$$

Donde:

$CP = \text{Potencia nominal de compresor sugerido}$

$EN = \text{Energía nominal por año de compresor sugerido}$

$P = \text{precio de kWh en aldea La Calera (Q.2.46)}$

**Tabla 5.**

*Proyección de ahorro energético y monetario de compresor actual versus compresor sugerido*

	Actual	Propuesta
Energía	424456 (KW)	323232 (KW)
Costo	Q 1,044,162.76	Q 795,150.72
Ahorro energético	-	101224 (KW)
%	-	24%
Ahorro monetario	-	Q 249,012.04

*Nota.* Detalle de la proyección anual, ahorro energético y costos de compresor actual versus compresor sugerido. Elaboración propia, realizado con Excel.

Finalmente, se analizaron los resultados para determinar el ahorro energético y monetario potencial al optar por el compresor sugerido. Esto se expresó tanto en términos absolutos como en porcentaje de mejora con respecto al compresor actual.

Esta proyección no solo es valiosa desde el punto de vista financiero, sino que también contribuye a una toma de decisiones estratégicas en relación con la eficiencia operativa y la gestión de recursos en la planta. En última instancia, ofrece una visión completa y basada en datos para respaldar la elección del compresor más adecuado para los objetivos y necesidades de la planta.

### **3. FASE DE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL DE MANTENIMIENTO**

#### **3.1. Situación previa de mantenimiento**

En el pasado, en la planta Orzunil 1, se implementaba un enfoque de mantenimiento mayormente preventivo, la planificación de estas actividades estaba a cargo del gerente general y se organizaba en ciclos trimestrales, semestrales y anuales, basándose en recomendaciones de Ormat; sin embargo, este método dejaba espacio para mejoras en la gestión del mantenimiento, ya que las recomendaciones de fábrica se basaban en experiencias de otras plantas de Ormat con similitudes, lo que no siempre reflejaba las particularidades de Orzunil 1. Esto generaba desafíos como discrepancias entre las recomendaciones y la experiencia práctica de los trabajadores, lo que requería ajustes en el cronograma de tareas.

#### **3.2. Situación actual de mantenimiento**

En la actualidad, la planta Orzunil 1 mantiene un enfoque continuo en el mantenimiento de tipo preventivo. El gerente de mantenimiento de la planta desarrolla el plan de mantenimiento anual en el mes de noviembre, el cual entra en vigencia en el ciclo siguiente, comenzando en abril del año siguiente. En otras palabras, el plan de mantenimiento correspondiente a abril de 2024 se elabora en noviembre de 2023. Este plan comprende las fechas en las que las unidades (conocidas como OEC, por sus siglas en inglés) se detendrán para realizar el mantenimiento preventivo y para el paro anual, en el cual toda la planta suspende

su producción. La aprobación o sugerencias de modificación de este plan recae en el Administrador del Mercado Mayorista (AMM).

Con base en el plan de mantenimiento aprobado, se lleva a cabo la detención de las unidades correspondientes, y cada área, incluyendo mecánica, electricidad e instrumentación y control, inicia sus respectivos trabajos de mantenimiento preventivo. Cada área sigue una lista de tareas preestablecida que se completa a medida que avanzan en sus actividades y se marca como completada. Esta lista se llena y se envía al gerente de mantenimiento una vez que se ha finalizado.

Cada unidad (OEC) permanece fuera de línea durante aproximadamente 2 semanas para el mantenimiento programado. Al inicio de cada semana, se lleva a cabo una reunión con el personal de mantenimiento para asegurar la comprensión de las tareas. A diario, los responsables de área se reúnen con sus equipos para asignar tareas específicas y reunir herramientas necesarias, si alguna herramienta no está disponible, se solicita a través del departamento de bodega y se asigna a la persona encargada; el equipo se dirige a la unidad designada y comienza a trabajar. Todo el proceso se registra y carga manualmente en un sistema en la nube de Ormat, accesible solo para el gerente de mantenimiento.

El proceso actual de mantenimiento preventivo implica la asignación y programación de todas las actividades. En caso de una falla importante no prevista, se realiza mantenimiento correctivo. Sin embargo, este último no se documenta, lo que dificulta rastrear o consultar información histórica. La falta de documentación incluye fecha, tareas, equipo utilizado, piezas reemplazadas, fotografías, documentos de respaldo y otros datos relevantes, creando una brecha en el seguimiento y análisis de eventos no programados.

### **3.3. Orden de trabajo**

“Constituye la comunicación de una intervención cuya finalidad es corregir un problema que se ha detectado en un equipo. Suele denominarse también Parte de Trabajo, Parte de Avería, Solicitud de Trabajo, Demanda de Trabajo, entre otros.” (García, 2003, p. 250).

#### **3.3.1. Orden de trabajo correctiva**

La Orden de Trabajo Correctiva consta de tres zonas claramente diferenciadas.

##### **3.3.1.1. Zona de la orden que cumplimenta el Solicitante**

Zona de la orden que cumplimenta el solicitante; a menudo, estas partes diferenciadas constituyen documentos diferentes. En la parte que cumplimenta el solicitante deben figurar los siguientes datos como menciona García (2003):

- NO de orden
- Nombre del solicitante
- Fecha y hora de la solicitud. Es conveniente registrar este dato con cierta exactitud, para poder determinar posteriormente la demora

en la intervención, el tiempo de máquina fuera de servicio, entre otros.

- Síntomas que presenta el equipo. Toda la información que se facilite al operario de mantenimiento la supondrá una disminución en el tiempo necesario para el diagnóstico, por lo que convendría detallar todos los datos que se pudiera sobre cómo se ha producido la avería, cuáles eran las condiciones exteriores al propio equipo, si se han observado ruidos o comportamientos anormales con anterioridad, entre otros.
- Nivel de prioridad. Deben establecerse diferentes niveles de prioridad para que el responsable de mantenimiento o el encargado de organizar el trabajo conozca la importancia que tiene la reparación (p. 250).

Actualmente, en Orzunil 1, se utiliza una Orden de Trabajo para gestionar las operaciones en la planta. Los operadores realizan rondas de inspección y, cuando identifican fallas o problemas, las reportan al equipo de mantenimiento. Cuando el equipo de mantenimiento soluciona la falla, se cierra la Orden de Trabajo correspondiente.

Sin embargo, este proceso presenta una limitación importante: no todos los trabajos de mantenimiento quedan registrados adecuadamente en las

Órdenes de Trabajo. Esto se debe a que muchas actividades de mantenimiento, tanto preventivo como correctivo, se realizan sin la apertura o el cierre formal de una Orden de Trabajo. Como resultado, no se recopila información completa sobre estos trabajos, lo que genera una brecha en el registro de las actividades de mantenimiento realizadas en la planta.

**Tabla 6.**

*Orden de trabajo de Orzunil 1*

MES:		Septiembre 2020	
LISTA DE ORDENES DE TRABA			
No.	Requerimiento de Trabajo Correctivo	Lugar de Falla	Requerido por:
<u>1</u>	Fuga en lateral de tapa trasera de separador	Sistemas Auxiliares	Raul Lamas
<u>2</u>	Vibración en bomba mecánica Lub. Oil y Seal Oil LPT	OEC1	Raul Lamas
<u>3</u>	Fuga de aire en el regulador del panel del vaporizador.	OEC1	Pablo Calderon
<u>4</u>	Valvula #4 del NCG posterior sin Cheque.	OEC3	Pablo Calderon
<u>5</u>	estructura de la OEC2 sin tensores, detras del shelter.	OEC2	Pablo Calderon
<u>6</u>	panel de aire de LPT con fuga en el visor del regulador	OEC2	Pablo Calderon
<u>7</u>	Colocar estructura condensador a la par de shelter	OEC5	Ronald Ramirez
<u>8</u>	Fuga de vapor en el eje de la Valvula de aislamiento	ZCQ3	Pablo Calderon
<u>9</u>	PT del cabezal del ZD6 descalibrado.	ZD6	Pablo Calderon
<u>10</u>	FAN # 5, Queda fuera de linea por fuerte ruido	OEC 2	Jorge [compar]
<u>11</u>	Manometro descalibrado, necesita cambio	Cabezal del ZD6	Jorge [compar]
<u>12</u>			
<u>13</u>			

Continuación de la tabla 6.

MES:		Septiembre 2020		
<b>LISTA DE ORDENES DE TRABAJO</b>				
No.	Requerimiento de Trabajo Correctivo	Lugar de Falla	Requerido por:	
<b>ORDEN DE TRABAJO CORRECTIVO</b>				
	Fecha	Prioridad	Conocimiento de Mantenimiento	
			Responsable	Fecha
		ALTA		
		ALTA		
		MEDIA	Jorge Garcia	Pendiente
		MEDIA	Jorge Garcia	Pendiente
		MEDIA		
		MEDIA	Jorge Garcia	07/09/2020
		MEDIA		
		MEDIA		
		MEDIA	Jorge Garcia	08/09/2020
		ALTA		
		MEDIA	Jorge Garcia	08/09/2020

*Nota.* Orden de trabajo que se utiliza actualmente en Orzunil 1. Elaboración propia, realizada con Excel.

### 3.3.1.2. Zona de la orden que cumplimenta el ejecutante

La zona de la O.T. que cumplimenta el ejecutante debería contener, al menos, estos datos que describe García (2003):

- Fecha y hora del inicio de la intervención.

- Personas que han intervenido
- Fecha y hora del final de la intervención
- Repuesto consumido
- Descripción de los trabajos realizados
- El estado en que queda la O.T. (finalizada totalmente, finalizada provisionalmente, o no finalizada).
- Observaciones. Este es el espacio dedicado a sugerencias, comentarios, entre otros. (p. 252).

Esta sección de la Orden de Trabajo, que es completada por el ejecutante, desempeña un papel fundamental en la gestión del mantenimiento. En ella, se registran datos esenciales que incluyen la fecha y hora de inicio de la intervención, la lista de las personas involucradas, la fecha y hora de finalización de la tarea, el registro de repuestos consumidos, una descripción detallada de los trabajos realizados, el estado en el que queda la Orden de Trabajo (ya sea finalizada en su totalidad, de manera provisional o no finalizada), y un espacio para observaciones, sugerencias o comentarios adicionales.

Esta sección de la Orden de Trabajo es especialmente relevante, ya que aquí se implementó el programa de control de mantenimiento. Su objetivo es

garantizar un registro completo y detallado de todas las actividades de mantenimiento realizadas en la planta Orzunil 1. Además, este registro se almacena de manera segura en una base de datos de fácil acceso, lo que facilita la gestión de datos y la generación de informes.

A partir de esta estructura de la Orden de Trabajo, que es cumplimentada por el ejecutante, se creó y diseñó el sistema de control de mantenimiento específico para la planta Orzunil 1. Este sistema se ha desarrollado considerando los requisitos y las opiniones del gerente de mantenimiento y los encargados de área, asegurando así su utilidad y eficacia para la planta.

### **3.3.2. Indicadores de gestión de órdenes de trabajo**

Los indicadores de gestión de órdenes de trabajo brindan información y ayudan a identificar y áreas de oportunidad. La integración brindará información valiosa para tomar decisiones estratégicas, evaluar la eficiencia de las operaciones y optimizar la planificación del mantenimiento en la planta Orzunil 1.

#### **3.3.2.1. Número de órdenes de trabajo generadas en un período determinado**

Es discutible si el número de Órdenes de Trabajo es un indicador muy fiable sobre la carga de trabajo en un periodo, ya que 100 Órdenes de Trabajo de una hora pueden agruparse en una sola Orden de Trabajo con un concepto más amplio. No obstante, dada la sencillez con que se obtiene este dato, suele ser un indicador muy usado. La información que facilita este indicador es más representativa cuanto mayor sea la cantidad media

de O.T que genera la planta. Así, es fácil que en una planta que genera menos de 100 O.T. de mantenimiento mensuales la validez de este indicador sea menor que una planta que genera 1000 O.T. (García, 2003, p. 259).

Este indicador se incorporará en el sistema de control de mantenimiento una vez que se implemente. Su función principal será establecer conexiones más precisas entre las Órdenes de Trabajo y el tiempo dedicado al mantenimiento de los equipos en la planta. Además, permitirá una visión más detallada de qué equipos requieren una atención más constante y en qué áreas específicas se realizan un mayor número de intervenciones para el mantenimiento de las unidades.

La integración de este indicador en el sistema brindará una perspectiva valiosa para tomar decisiones estratégicas sobre la asignación de recursos y el plan de mantenimiento. También permitirá evaluar de manera más efectiva la eficiencia de las operaciones de mantenimiento, identificar posibles áreas de mejora y optimizar la planificación de las intervenciones futuras en la planta Orzunil 1.

#### **3.4. Gestión de la información asistido por ordenador (GMAO)**

En cuanto a la tendencia, la informatización en los departamentos de mantenimiento de las grandes industrias se presenta con ventajas y desventajas, siendo necesario analizar cuándo es beneficioso y cuándo puede obstaculizar la función de mantenimiento. Entre las ventajas destacadas de un sistema informático se encuentra el control sobre la actividad y el gasto de mantenimiento,

así como la facilidad para consultar registros históricos y obtener indicadores clave. (García, 2003).

#### **3.4.1. Objetivos que se pretenden con la informatización**

La tendencia general de los departamentos de mantenimiento de las grandes industrias es hacia la informatización. Esta informatización, no obstante, presenta ventajas e inconvenientes que hacen que sea necesario analizar cuando es interesante esta informatización y cuándo la herramienta informática se convierte en un obstáculo que ralentiza y encarece la función mantenimiento (García, 2003, p. 274).

Entre las ventajas más sobresalientes de un sistema informático cabría citar las siguientes como describe García (2003):

- Control sobre la actividad de mantenimiento.
- Control sobre el gasto
- Facilidad para la consulta de históricos
- Facilidad para la obtención de ratios e indicadores.

Entre los inconvenientes, estarían:

- Alta inversión inicial, tanto en equipos como en programas y en mano de obra para la implantación.
- Burocratización del sistema.
- En muchos casos, aumento del personal indirecto dedicado a tareas improductivas.
- La información facilitada a menudo no es suficientemente fiable (p. 274).

Para abordar el proyecto en la planta Orzunil 1, se propuso la implementación de un sistema de gestión de información asistido por ordenador. Esta elección se basó en la necesidad de informatizar y optimizar las operaciones de mantenimiento de la planta, permitiendo un control más efectivo y la consulta sencilla de registros históricos. La información recopilada a través de esta plataforma será fundamental para respaldar futuras decisiones estratégicas.

La importancia de esta implementación se destaca debido a la complejidad de la planta Orzunil 1, que cuenta con numerosas unidades productoras y equipos auxiliares, además de una larga trayectoria en operación. En este contexto, resulta esencial contar con un sistema que estandarice los informes y facilite el seguimiento de las actividades de mantenimiento. Entre las ventajas adicionales, este programa contribuirá al ahorro de costos y garantizará que la

información esté disponible de manera segura, rápida y precisa para todos los involucrados en el proceso de mantenimiento.

### **3.4.2. Proceso de implementación**

La implementación de un programa de Gestión de Mantenimiento es fundamental para optimizar las operaciones de mantenimiento en cualquier empresa. Este permite planificar, programar y controlar todas las actividades de mantenimiento, lo que permite una gestión más eficiente de los recursos y una reducción de los tiempos de inactividad no planificados. Además, facilita la generación de informes detallados y el seguimiento del rendimiento de los equipos, lo que ayuda a tomar decisiones más informadas para mejorar la fiabilidad y la disponibilidad de los activos (García 2003).

Las etapas del proceso de implantación son las siguientes:

#### **3.4.2.1. Análisis de equipos**

Cada equipo ocupa una posición distinta en el proceso industrial, y tiene unas características propias que lo hacen diferente del resto, incluso de otros equipos similares. Esto quiere decir que una bomba o un motor pueden necesitar de unas tareas de mantenimiento, mientras que otra bomba y otro motor similares pueden necesitar de otro tipo de tareas muy distintas. Si queremos optimizar, ya no es suficiente con pensar en el tipo de instalación o en las características del equipo. Es necesario tener en cuenta toda una serie de factores, como el coste de una parada de producción, su influencia en la seguridad, el coste de una reparación, entre

otros, que van a determinar las tareas de mantenimiento más convenientes para cada equipo. (García, 2003, p. 7)

En el contexto de la planta Orzunil 1, se llevó a cabo un análisis para determinar qué equipos debían ser incorporados al programa de control de mantenimiento. Este análisis priorizó especialmente aquellos equipos que tienen un impacto significativo en la producción, así como los equipos auxiliares que respaldan el funcionamiento general de la planta. Además, se consideraron equipos que, aunque no inciden directamente en la operación y el mantenimiento, eran relevantes para un enfoque integral.

El proceso de análisis se inició con una exhaustiva revisión del manual completo de operaciones y mantenimiento de la planta Orzunil 1. Posteriormente, se realizó un recorrido por las áreas de producción y las zonas de equipos auxiliares para verificar y validar la información recopilada del manual. Para enriquecer aún más este análisis, se colaboró estrechamente con los responsables de cada área y se contó con la valiosa orientación del gerente de mantenimiento.

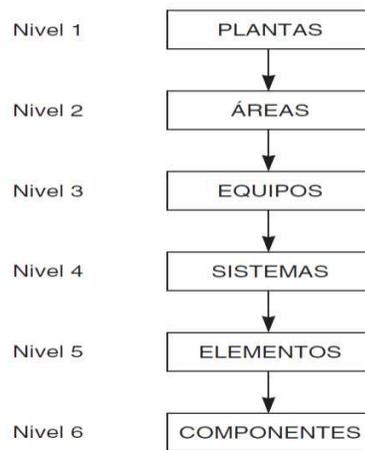
#### **3.4.2.2. Lista de equipos**

El primer problema que se plantea al intentar realizar un Análisis de Equipos es elaborar una lista ordenada de los equipos que hay en ella. Realizar un inventario de los activos de la planta es algo más complejo de lo que pueda parecer en un primer momento. Una simple lista de todos los motores, bombas, sensores, entre otros, de la planta no es útil ni práctica. Una lista de estas características no es más que una lista de datos, no es

información. Si queremos elaborar una lista de equipos realmente útil, debemos expresar esta lista en forma de estructura arbórea, en la que se indiquen las relaciones de dependencia de cada uno de los ítems con los restantes (García, 2003, p. 8).

En una planta industrial podemos distinguir los siguientes niveles, a la hora de elaborar esta estructura arbórea:

**Figura 3.**  
*Estructura arbórea*



*Nota.* Estructura arbórea. Obtenido de S. García (2003). *Organización y gestión integral de mantenimiento.* (p. 8.) Ediciones Díaz de Santos, S.A.

En Orzunil 1, se llevó a cabo un minucioso análisis de los equipos de la planta como parte del proceso de implementación del GMAO, con el objetivo de reorganizar eficazmente las operaciones de mantenimiento. Para lograr una gestión más eficiente de la información, se optó por utilizar una estructura arbórea

que permitiera la clasificación de los equipos y sistemas de la planta de manera que el equipo de mantenimiento pudiera acceder de manera clara y rápida a la información requerida a través del GMAO.

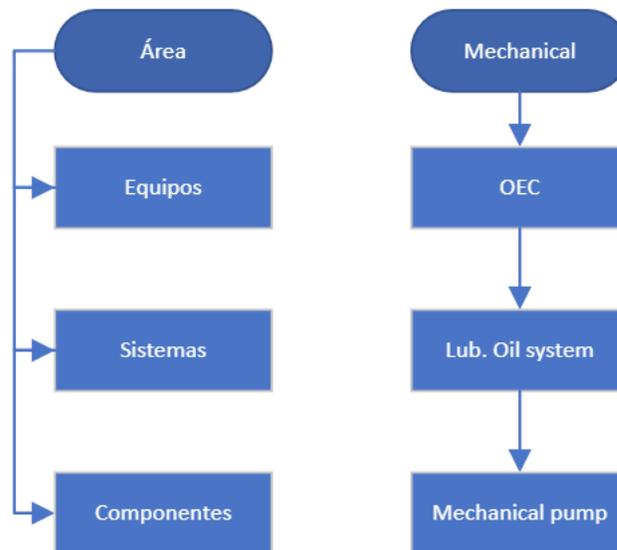
El proceso se inició con la realización de un inventario exhaustivo de los equipos y sistemas de la planta. Dado que existen siete unidades idénticas en la planta, se seleccionó una de ellas como punto de partida para crear una lista completa de equipos, la cual posteriormente se replicó para el resto de las unidades.

La estructura de clasificación se definió en colaboración con los responsables de cada área y el gerente general de mantenimiento. Este proceso incluyó una revisión minuciosa del manual completo de la planta Orzunil 1, lo que proporcionó una comprensión detallada de la función y operación de las unidades generadoras y los sistemas auxiliares que conforman la planta.

Además, se llevó a cabo un recorrido exhaustivo por todas las áreas de la planta para analizar cada unidad y sistema auxiliar. Esta exploración permitió identificar todos los equipos, sistemas y componentes utilizados en la planta, lo que a su vez facilitó la creación de listados completos de equipos y sistemas que serían incorporados al sistema de control de mantenimiento.

**Figura 4.**

*Estructura arbórea de control de mantenimiento*



*Nota.* Estructura arbórea que se realizó para el control de mantenimiento de la planta Orzunil 1. Elaboración propia, realizado con Visio.

### **3.4.2.3. Carga de los equipos en el sistema**

La carga de los equipos de la planta Orzunil 1 se realizó a través de una aplicación de Microsoft llamada Power Apps. La facilidad y la compatibilidad que este programa tiene con el software existente en la planta fue elemental en el proceso creativo para el montaje del programa de mantenimiento.

#### **3.4.2.3.1. Power Apps**

Power Apps es un conjunto de aplicaciones, servicios y conectores, así como una plataforma de datos que proporciona un entorno de desarrollo

de aplicaciones ágiles para crear aplicaciones personalizadas para las necesidades de su empresa. Al usar Power Apps, puede crear aplicaciones empresariales de forma rápida que se conectan a los datos de su negocio almacenados en la plataforma de datos subyacentes. Las aplicaciones creadas usando Power Apps ofrecen una completa lógica de negocios y capacidades de flujo de trabajo con el fin de transformar las operaciones empresariales manuales para procesos digitales y automatizados. Además, las aplicaciones creadas con Power Apps presentan un diseño dinámico y pueden ejecutarse sin problemas en un explorador y en dispositivos móviles (teléfono o tableta). (Kumar, 2023)

Para la implementación del control de mantenimiento en la planta Orzunil 1, se tomó la decisión de trabajar con la plataforma Power Apps de Microsoft. Esta elección se basó en la compatibilidad de esta suite de aplicaciones con las herramientas ya utilizadas en la planta. Un factor adicional que influyó en esta elección fue la ausencia de costos adicionales relacionados con la adquisición de licencias para programas de mantenimiento independientes. Power Apps, al ser un entorno de desarrollo abierto y flexible, se integró de manera eficiente con Excel para facilitar la carga y gestión de datos, en este caso, las listas de equipos incorporadas en el control de mantenimiento. Esta sinergia entre Power Apps y Excel optimizó la recopilación y el uso de información crítica para el mantenimiento de la planta Orzunil 1.

**Tabla 7.**

*Ejemplo de equipos y sistemas del control de mantenimiento*

Equipment	System	Component	Component 2	PowerAppsid
OEC	Lub. oil system	Mechanical pump		5d18ad58-296f-4577-b2f0-9c7c7882416b
OEC	Lub. oil system	Pneumatic pump		33c6719c-14ab-4094-bdab-e0bb969a1f39
OEC	Lub. oil system	Hydraulic block		b0b9c301-b732-4423-b2ae-cc02215e087c
OEC	Lub. oil system	Hydraulic block	Oil adapter	98aebbed-6c54-4420-b6f6-0675f72f6218
OEC	Lub. oil system	Hydraulic block	Manifold	c26e3869-de17-44f4-b684-f767c0692376

*Nota.* Ejemplo de equipos y sistemas que se incluyeron en el control de mantenimiento, siguiendo la estructura arbórea. Elaboración propia, realizada con Excel.

#### **3.4.2.3.2. Creación de documentos personalizados**

El programa de control de mantenimiento desarrollado para este proyecto consta de múltiples pantallas accesibles desde computadoras, tabletas y teléfonos móviles. Se creó una aplicación base que abarcaba la programación y el diseño de todas las funcionalidades necesarias, la cual se clonó para crear una versión personalizada para cada área asignada: mecánica, eléctrica e instrumentación y control; cada aplicación fue adaptada según los requisitos específicos de su área correspondiente, maximizando su funcionalidad. Todas las aplicaciones incluyen botones de navegación para un acceso rápido a las pantallas principales, registro de datos, búsqueda y detalles de registros.

Para el gerente de mantenimiento, se diseñó una aplicación independiente con acceso exclusivo; esta aplicación tiene como principal función presentar los registros en los que se ha trabajado. En un esfuerzo por mantener la integridad de los datos, solo el gerente tiene la capacidad de realizar modificaciones o eliminaciones de registros, con el fin de evitar cambios no autorizados o eliminaciones accidentales.

En el proyecto, se estableció una plantilla estándar que los encargados de área pueden utilizar para ingresar los datos más relevantes que contribuyan a un mejor control en el mantenimiento de la planta.

El programa de control de mantenimiento se desarrolló de manera que fuera compatible con diversas plataformas, incluyendo computadoras, tabletas y dispositivos móviles.

Un aspecto fundamental es que los datos introducidos por los encargados de área se sincronizan automáticamente con SharePoint, una plataforma alojada en la nube de Microsoft 365. Esto garantiza que una vez que la información se ingresa en la plataforma, esté disponible de inmediato en cualquier dispositivo conectado a la nube, en cualquier parte del mundo. Esta flexibilidad permite a los encargados de área y al gerente de mantenimiento acceder a la información desde cualquier ubicación, dispositivo y momento, siempre que inicien sesión con su usuario de Microsoft proporcionado por la planta.

Otra ventaja significativa de esta solución es que permite el almacenamiento digital de datos en la nube, eliminando así la necesidad de depender de una única computadora para el almacenamiento y visualización de información, lo que facilita la accesibilidad y la colaboración en tiempo real.

### **3.4.3. Interfaz del encargado de área**

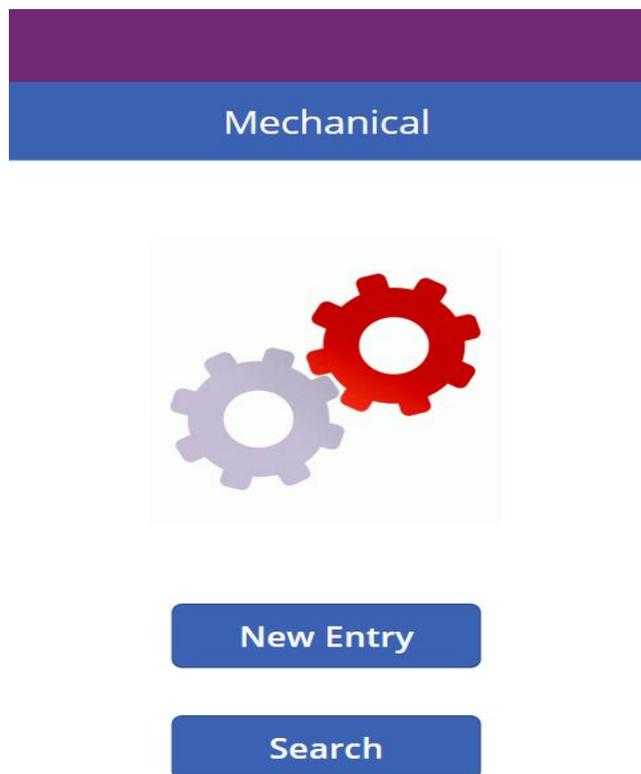
La interfaz del encargado de área será la que tenga acceso tanto el encargado de área como el gerente de mantenimiento. Esta interfaz será donde el encargado de área pueda acceder y crear nuevos registros de mantenimiento.

### 3.4.3.1. Pantalla de inicio

La pantalla de inicio es la primera interfaz que se presenta al usuario al acceder a la aplicación, ya sea desde un teléfono celular o una computadora. En esta pantalla, se encuentran disponibles dos opciones principales: New Entry (Nuevo registro) y Search (Búsqueda de registros).

#### Figura 5.

*Pantalla inicio*



*Nota.* Detalle de la pantalla de inicio de la aplicación del control de mantenimiento. Elaboración propia, realizada con Power Apps.

### **3.4.3.2. Creación de nuevo registro**

La pantalla de New Entry (Nuevo registro) es el espacio donde los encargados de área tienen la capacidad de registrar tanto los trabajos recientes realizados en la planta como de cerrar las órdenes de trabajo iniciadas por el equipo de operaciones. Esta pantalla se compone de los siguientes campos:

- Control ID: se trata de una identificación asignada automáticamente por el programa para distinguir cada registro creado.
- Date: indica la fecha en que se efectuó la intervención o trabajo
- Equipement: identifica el equipo en el que se realizó el trabajo
- Wellpad: refiere a la ubicación específica del pozo en el que se efectuó el trabajo.
- No.: corresponde al número de identificación del equipo en el que se realizó el trabajo.
- System: indica el sistema en el que se llevó a cabo la labor
- Component: se utiliza para especificar si el trabajo se llevó a cabo en un componente particular dentro del sistema.
- Serial: en el caso de reparaciones o reemplazos de motores en sistemas auxiliares o unidades productoras, este campo registra el número de serie del motor para rastrear su historial y ubicación.

- Issue: ofrece una descripción del problema o fallo que llevó a la apertura de la orden de trabajo.
- Performed tasks: describe las tareas ejecutadas para solucionar la falla o el trabajo realizado. En este campo, también se pueden incluir las herramientas utilizadas y los materiales consumidos.
- Pictures: permite cargar imágenes que actúen como evidencia del trabajo realizado.
- Attachments: en este apartado, se pueden anexar archivos necesarios, como resultados de alineaciones, balances de turbinas o informes de pruebas Megger en generadores.

Esta pantalla proporciona una interfaz completa para documentar y registrar con precisión todas las actividades de mantenimiento y reparación en la planta.

**Figura 6.**

*Pantalla de nuevo registro*

The screenshot shows a mobile application interface for creating a new entry. The title bar at the top is blue and labeled 'New Entry'. The form is divided into two vertical sections. The left section contains the following fields: a required field for 'Control ID' with the value 'Jo071023210952'; a required field for 'Date' with the value '10/7/2023' and a calendar icon; a dropdown menu for 'Equipment'; a dropdown menu for 'System'; a 'Serial' field with a toggle switch currently turned off; and a required field for 'Issue'. The right section contains a required field for '\* Performed tasks'; a 'Picture' section with a text prompt 'Tap or click to add a picture'; and an 'Attachments' section with the text 'There is nothing attached.' and a button labeled 'Attach file' with a paperclip icon.

*Nota.* Detalle de la pantalla de nuevo registro de la aplicación del control de mantenimiento dividida en dos verticalmente. Elaboración propia, realizada con Power Apps.

### **3.4.3.3. Búsqueda de registros**

La pantalla de Search (Búsqueda de registros) es la herramienta que permite a los encargados de área buscar tanto los registros previamente ingresados de trabajos realizados en la planta como las órdenes de trabajo que han sido cerradas en el pasado.

## Figura 7.

### Pantalla de búsqueda de registros



*Nota.* Detalle de apartado de búsqueda de registros en el control de mantenimiento. Elaboración propia, realizada con Power Apps.

#### 3.4.3.4. Detalle de registros

La pantalla Details (Detalle de registros) es aquella que despliega información detallada cuando se selecciona cualquier registro de la pantalla de búsqueda. El informe detallado contiene los siguientes apartados:

- Control ID: esta es una identificación automática asignada por el programa para identificar cada registro creado.
- Fecha: representa la fecha en que se llevó a cabo la intervención o trabajo.
- Equipo: indica el equipo en el que se realizó el trabajo.
- Wellpad: muestra la ubicación del pozo donde se llevó a cabo la tarea.
- No.: es el número de identificación del equipo en el que se realizó el trabajo.
- Sistema: hace referencia al sistema en el que se efectuó la intervención.
- Componente: si el trabajo se realizó en un componente específico dentro del sistema, se mostrará en este apartado.
- Serial: aquí se visualiza el número de serie del componente o sistema que fue instalado o reemplazado.
- Problema: proporciona una descripción del problema o falla que condujo a la apertura de la orden de trabajo.
- Tareas Realizadas: contiene una descripción de las tareas ejecutadas para resolver la falla o llevar a cabo el trabajo, incluyendo cualquier herramienta o suministro utilizado.
- Fotografía: si se tomó una fotografía como evidencia del trabajo realizado, se mostrará en este apartado.



### 3.4.4. Interfaz del gerente de mantenimiento

En esta interfaz el gerente de mantenimiento será el único usuario que tendrá acceso. Este usuario podrá ver registros crear, modificar y eliminar registros.

#### 3.4.4.1. Pantalla de inicio

La pantalla de inicio es la primera interfaz que el usuario, en este caso el gerente de mantenimiento encuentra al acceder a la aplicación, ya sea desde un teléfono celular o una computadora. Esta pantalla da la bienvenida al usuario y proporciona la opción de visualizar los registros generados por los encargados de área.

#### Figura 9.

*Pantalla inicio*



*Nota.* Detalle de la pantalla de inicio de la aplicación del control de mantenimiento. Elaboración propia, realizada con Power Apps.

### 3.4.4.2. Búsqueda de registros

La pantalla de búsqueda de registros, denominada "Records", está diseñada para que el gerente de mantenimiento pueda buscar los registros enviados por los encargados a través de sus aplicaciones dedicadas; al acceder a esta pantalla, se mostrarán todos los registros de todas las áreas de manera conjunta.

El usuario puede utilizar los filtros ubicados en la parte superior para realizar búsquedas específicas; estos filtros permiten categorizar los registros por área, equipos, sistemas, así como buscar por fecha o número de serie de forma independiente; una vez encontrado el registro deseado, basta con hacer clic sobre él para acceder a la pantalla de detalles, donde se podrá visualizar toda la información relacionada con dicho registro.

**Figura 10.**

*Pantalla de búsqueda de registros*



*Nota.* Detalle de búsqueda de registros en el control de mantenimiento. Elaboración propia, realizada con Power Apps.

### **3.4.4.3. Detalle de registros**

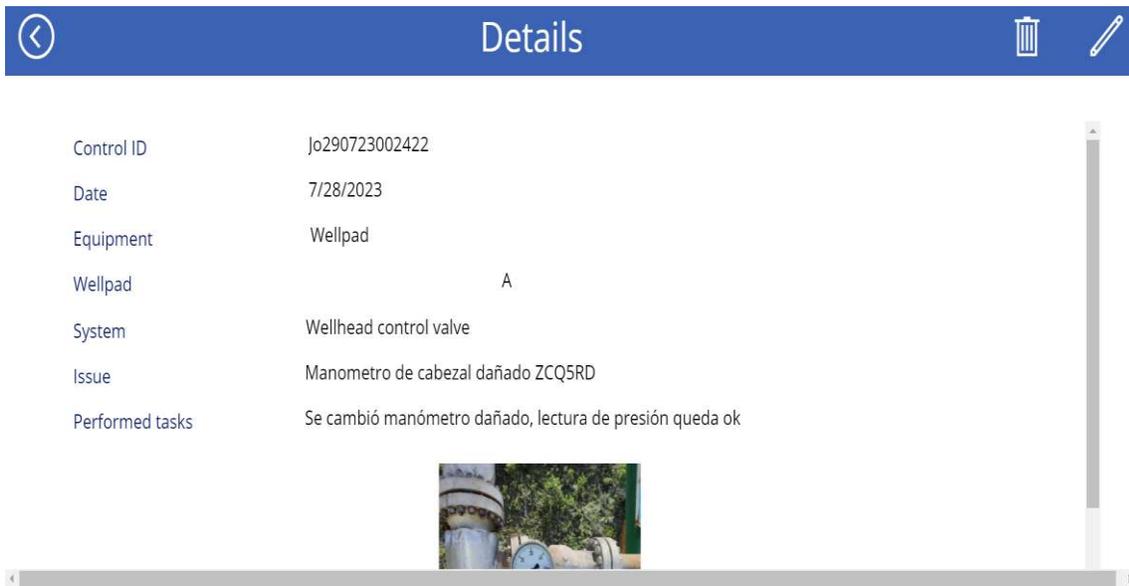
La pantalla de detalles, denominada "Details", proporciona información detallada de cada registro seleccionado desde la pantalla de búsqueda. Este informe de detalle incluye los siguientes campos:

- Control ID: esta es una identificación asignada automáticamente por el programa para identificar cada registro creado.
- Date: indica la fecha en que se llevó a cabo la intervención o trabajo.
- Equipment: muestra el equipo en el que se realizó el trabajo.
- Wellpad: indica la ubicación del pozo donde se efectuó el trabajo.
- No.: refleja el número de identificación del equipo en el que se realizó la tarea.
- System: describe el sistema en el que se ejecutó el trabajo.
- Component: si el trabajo involucra un componente específico dentro del sistema, se registra en este campo.
- Serial: este campo muestra el número de serie del componente o sistema que se instaló o cambió.
- Issue: describe la falla o problema que motivó la apertura de la orden de trabajo.

- Performed tasks: detalla las tareas realizadas para resolver la falla o llevar a cabo el trabajo, y puede incluir información sobre las herramientas y suministros utilizados.
- Picture: aquí se muestra cualquier fotografía tomada como evidencia del trabajo realizado.
- Attachments: este apartado contiene cualquier archivo adjunto que respalde el trabajo ejecutado.

**Figura 11.**

*Pantalla de detalle*



*Nota.* Detalle de apartado de detalle de registros en el control de mantenimiento. Elaboración propia, realizada con Power Apps.

#### **3.4.4.4. Edición de registros**

La pantalla de edición de registros, denominada Edit, permite al usuario, en este caso, al gerente de mantenimiento, modificar los registros ingresados por los encargados de área.

Esta pantalla de edición consta de los siguientes apartados:

- Control ID: se trata de una identificación asignada automáticamente por el programa para identificar cada registro creado.
- Date: indica la fecha en que se realizó la intervención o trabajo.
- Equipment: muestra el equipo en el que se efectuó el trabajo.
- Wellpad: indica la ubicación del pozo donde se llevó a cabo el trabajo.
- No.: refleja el número del equipo en el que se realizó la tarea.
- System: describe el sistema en el que se ejecutó el trabajo.
- Component: si el trabajo se llevó a cabo en un componente específico dentro del sistema, se registra en este campo.
- Serial: cuando se repara o cambia un motor de un sistema auxiliar o una unidad productora, se anota el número de serie del motor para su seguimiento y ubicación histórica.

- Issue: describe la falla o problema que motivó la apertura de la orden de trabajo.
- Performed tasks: detalla las tareas que se llevaron a cabo para resolver la falla o realizar el trabajo, y puede incluir información sobre las herramientas utilizadas y los insumos.
- Picture: en este campo, se pueden cargar fotos como evidencia del trabajo realizado.
- Attachments: aquí es posible adjuntar archivos que sean necesarios, como los resultados de la alineación o balanceo de una turbina o los resultados de las pruebas Megger de generadores.

### Figura 12.

*Pantalla de edición de registros*

Control ID: Jo290723002422

Date: 7/28/2023

Equipment: Wellpad

Wellpad: A

No.:

System: Wellhead control valve

*Nota.* Detalle de la pantalla de edición registro de la aplicación del control de mantenimiento. Elaboración propia, realizada con Power Apps.

## **4. FASE DE DOCENCIA. CAPACITACIÓN DEL PERSONAL SOBRE EL CONTROL DE MANTENIMIENTO**

Una de las etapas críticas en la implementación exitosa del nuevo Sistema de Gestión de Mantenimiento Asistido por Computadora (GMAO) en la planta Orzunil 1 es la capacitación del personal. Comprendemos que una herramienta tan poderosa como nuestro GMAO solo puede ser efectiva si todos los miembros del equipo comprenden su funcionamiento y pueden utilizarlo de manera eficiente.

### **4.1. Capacitación inicial**

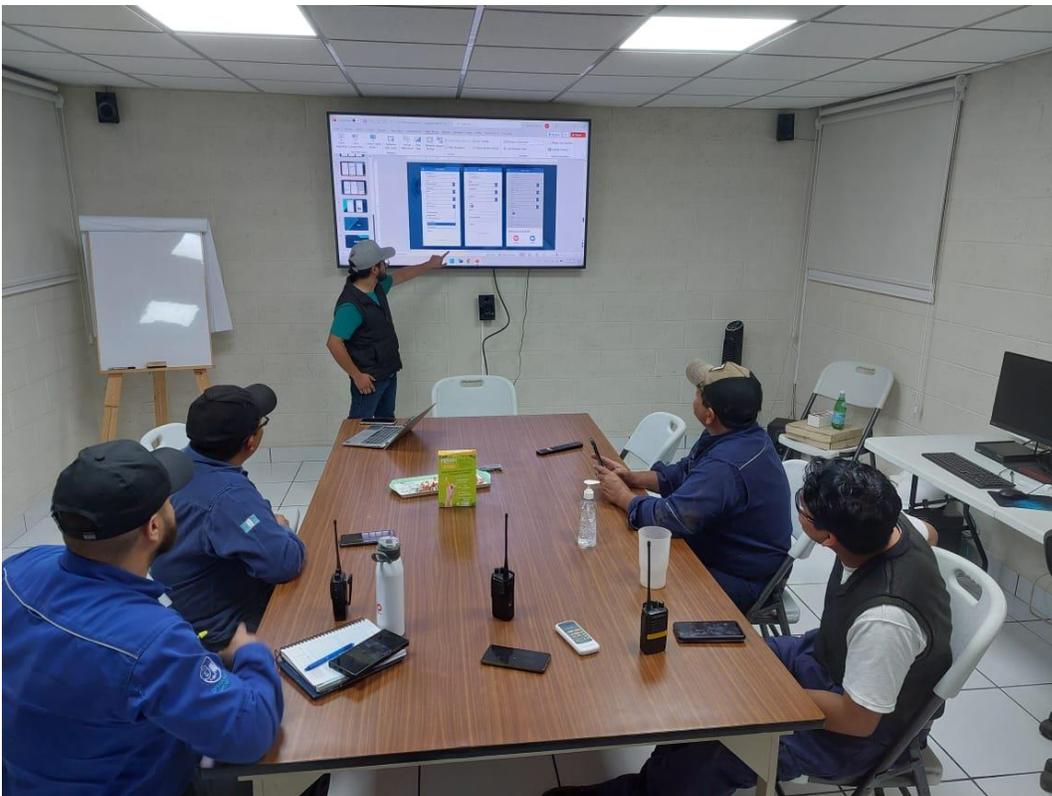
La capacitación inicial se llevó a cabo antes de la plena implementación del GMAO. Este proceso brindó a los usuarios una comprensión sólida de la estructura y la navegación del sistema. Los aspectos fundamentales que se abordaron incluyeron:

- Acceso y autenticación en el sistema
- Navegación por las pantallas principales
- Creación de nuevos registros
- Búsqueda y recuperación de registros existentes
- Edición y actualización de información

- Carga de imágenes y archivos adjuntos
- Uso de filtros y herramientas de búsqueda avanzada.

### **Figura 13.**

#### *Capacitación inicial*



*Nota.* Fotografía de la capacitación inicial del control de mantenimiento de Orzunil 1. Elaboración propia.

#### **4.2. Capacitación específica por área**

Dado que el GMAO se personalizó según las necesidades de cada área, se proporcionó capacitación específica para los encargados de área; esto incluyó

detalles sobre cómo registrar y administrar trabajos y registros relacionados con equipos específicos y sistemas auxiliares. Los aspectos adicionales que se abordaron incluyeron:

- Registro y seguimiento de trabajos realizados en equipos particulares.
- Uso de campos y categorías específicas para cada área.

**Figura 14.**

*Capacitación por área*



*Nota.* Fotografía de la capacitación inicial del control de mantenimiento de Orzunil 1. Elaboración propia.

#### **4.3. Capacitación del gerente de mantenimiento**

El gerente de mantenimiento recibió una capacitación especializada que le permitió supervisar y administrar todo el sistema de GMAO. Esto incluyó la revisión de registros, el seguimiento del rendimiento del equipo y la identificación de áreas de mejora.

La capacitación del gerente de mantenimiento también se centró en cómo generar informes y análisis que respaldaran la toma de decisiones informadas.

#### **4.4. Retroalimentación y experiencia de los usuarios**

Después de la capacitación y la implementación del GMAO, brindamos la oportunidad a los usuarios de compartir sus experiencias y comentarios. Esto fue fundamental para ajustar y mejorar continuamente el sistema según sus necesidades y retroalimentación. Los usuarios destacaron la facilidad de uso del GMAO y cómo simplificó sus tareas diarias de mantenimiento.

#### **4.5. Beneficios en el rendimiento de mantenimiento**

La implementación exitosa del GMAO tuvo un impacto significativo en el rendimiento de mantenimiento de la planta Orzunil 1. Algunos de los beneficios clave incluyeron:

- Mayor eficiencia en la gestión de registros de mantenimiento
- Mejora en la programación y ejecución de tareas preventivas

- Reducción del tiempo de inactividad no planificado debido a un mantenimiento más proactivo.
- Mayor visibilidad y seguimiento del rendimiento de los equipos y sistemas.
- Mejora en la toma de decisiones basada en datos sólidos.

La capacitación adecuada y la retroalimentación continua de los usuarios fueron elementos fundamentales en el éxito de nuestra implementación de GMAO. Los beneficios en el rendimiento de mantenimiento fueron evidentes y respaldaron el compromiso con la excelencia operativa en la planta Orzunil 1. Se continúa trabajando en estrecha colaboración con el equipo para garantizar que el GMAO siga siendo una herramienta valiosa en la gestión de mantenimiento.



## CONCLUSIONES

1. La implementación exitosa de un Sistema de Gestión de Mantenimiento Asistido por Computadora (GMAO) en la planta geotérmica Orzunil 1 representa un reto significativo en la mejora de la infraestructura de mantenimiento y operaciones. Este sistema está demostrando ser una herramienta invaluable para el seguimiento y control de las actividades de mantenimiento en toda la planta. A través de la incorporación de tecnología avanzada y la capacitación efectiva del personal, se ha logrado alcanzar una mejora en el área de mantenimiento.
2. La propuesta de incorporar un nuevo compresor, específicamente el modelo Atlas GA 37L VSD+, marca un avance significativo hacia la mejora de la eficiencia operativa y la sostenibilidad en la planta. Los beneficios son notables tanto desde una perspectiva energética como financiera, con un ahorro estimado de 101,224 (KW) anuales. Este ahorro energético se traduce en un ahorro financiero anual estimado de Q 249,012.04.
3. El diseño e implementación de un Sistema de Control de Mantenimiento informatizado en todas las áreas de la planta Orzunil 1 representa un avance significativo en la gestión de mantenimiento. Esto permitirá un seguimiento más preciso de las actividades de mantenimiento, una planificación más eficiente y la generación de datos valiosos para la toma de decisiones.

4. La capacitación y recopilación de la experiencia de los usuarios y la retroalimentación constante han contribuido a la mejora continua del sistema. Esta interacción con los usuarios ha permitido identificar áreas adicionales de mejora y ajustar el GMAO para satisfacer las necesidades cambiantes de la planta.

## RECOMENDACIONES

1. Al Gerente de Mantenimiento que supervise la implementación gradual del Sistema de Gestión de Mantenimiento Asistido por Computadora (GMAO) y establezca un sistema de monitoreo constante para evaluar su desempeño. Este sistema debe incluir revisiones periódicas de registros de mantenimiento, la recopilación de comentarios de los usuarios y la identificación de áreas de mejora. Fomentar una cultura de retroalimentación constante entre el personal de mantenimiento y otros usuarios es esencial para adaptar y optimizar continuamente el GMAO. El liderazgo del Gerente de Mantenimiento en este proceso garantizará que el GMAO siga siendo una herramienta eficaz y valiosa para la planta Orzunil 1.
2. Al Gerente General, evaluar las capacidades del compresor Atlas GA 37L VSD+ ya que ofrece un gran potencial para reducir significativamente los costos energéticos y la reducción en la huella de carbono. Para aprovechar al máximo el potencial de ahorro energético que ofrece el compresor Atlas GA 37L VSD+, se recomienda aprovechar la capacidad de velocidad variable del compresor para adaptar la producción de aire comprimido a la demanda real. A través de un sistema de control eficiente, ajustar la velocidad del compresor según las necesidades, reduciendo así el consumo energético en momentos de baja demanda. Realizar auditorías energéticas periódicas para evaluar el rendimiento del compresor e identificar oportunidades adicionales de ahorro energético en la planta.

3. Tanto el Gerente de Mantenimiento como los Encargados de Área, utilizar el GMAO constantemente para recopilar y analizar datos relacionados con el mantenimiento, lo que proporcionará información valiosa para la toma de decisiones informadas. Además, es esencial establecer un proceso formal de mejora continua basado en los resultados del análisis de datos, lo que permitirá optimizar aún más los procedimientos de mantenimiento y la eficiencia operativa en la planta. Estas recomendaciones asegurarán que la implementación y el uso del GMAO sean efectivos y contribuyan al éxito continuo de la planta geotérmica Orzunil 1.
  
4. La capacitación no debe ser un evento único, sino un proceso continuo; El Gerente de Mantenimiento asignará a una persona encargada de tomar el control del GMAO, revisarlo, actualizarlo, analizar datos y organizar sesiones de capacitación periódicas para asegurarse de que todos los usuarios estén al tanto de las últimas actualizaciones del GMAO y estén utilizando la herramienta de manera efectiva. Esto garantiza que el personal aproveche al máximo las capacidades del sistema.

## REFERENCIAS

- Atlas Copco Airpower. (2019). GA 50-150 VSD+ Horsepower Air Compressors. Atlascopco. <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/united-states/documents/GA%2050-150%20Horsepower%20VSD+%20Air%20Compressors.pdf>
- García, S. (2003). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- Kumar V. (2023, 16 marzo). *¿Qué es Power Apps? - Power Apps*. Microsoft Learn. <https://learn.microsoft.com/es-es/power-apps/powerapps-overview>
- Ormat. (2023). *Misión y valores*. Ormat Technologies Inc. <https://www.ormat.com/es/company/welcome/mission-and-values/#:~:text=En%20Ormat%2C%20nuestra%20misi%C3%B3n%20e,recuperada%20e%20instalaciones%20de%20almacenamiento>.
- Orzunil 1. (2001). *Zunil 1 Geothermal Power Plant: Job Book* (Vol. 3).
- Planas, O. (2019, 2 julio). *Ejemplos de la Primera Ley de la Termodinámica*. Energía geotérmica. <https://solar-energia.net/energias-renovables/energia-geotermica/central-geotermica#:~:text=Planta%20geot%C3%A9rmica%3A%20qu%C3%A9%20es%2C%20c%C3%B3mo%20funciona%20y%20tipos,genera%20el,electricidad%20mediante%20el%20calor%20de%20la%20Tierra.9/3/23>

Rodríguez, H. (2023). *Instalaciones de aire comprimido*.

<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn201.html>

Trigueros, L. (2017). ORMAT. *Geotérmica en Zunil*.

<http://lesvypatriciatrigueros.blogspot.com/2017/>

Westreicher, G. (2022, 24 noviembre). Energía geotérmica. Economipedia.

<https://economipedia.com/definiciones/energia-geotermica.html>

## APÉNDICES

### Apéndice 1.

*Toma de mediciones de voltaje de compresor*



*Nota.* Toma de mediciones de voltaje de compresor. Elaboración propia.

## Apéndice 2.

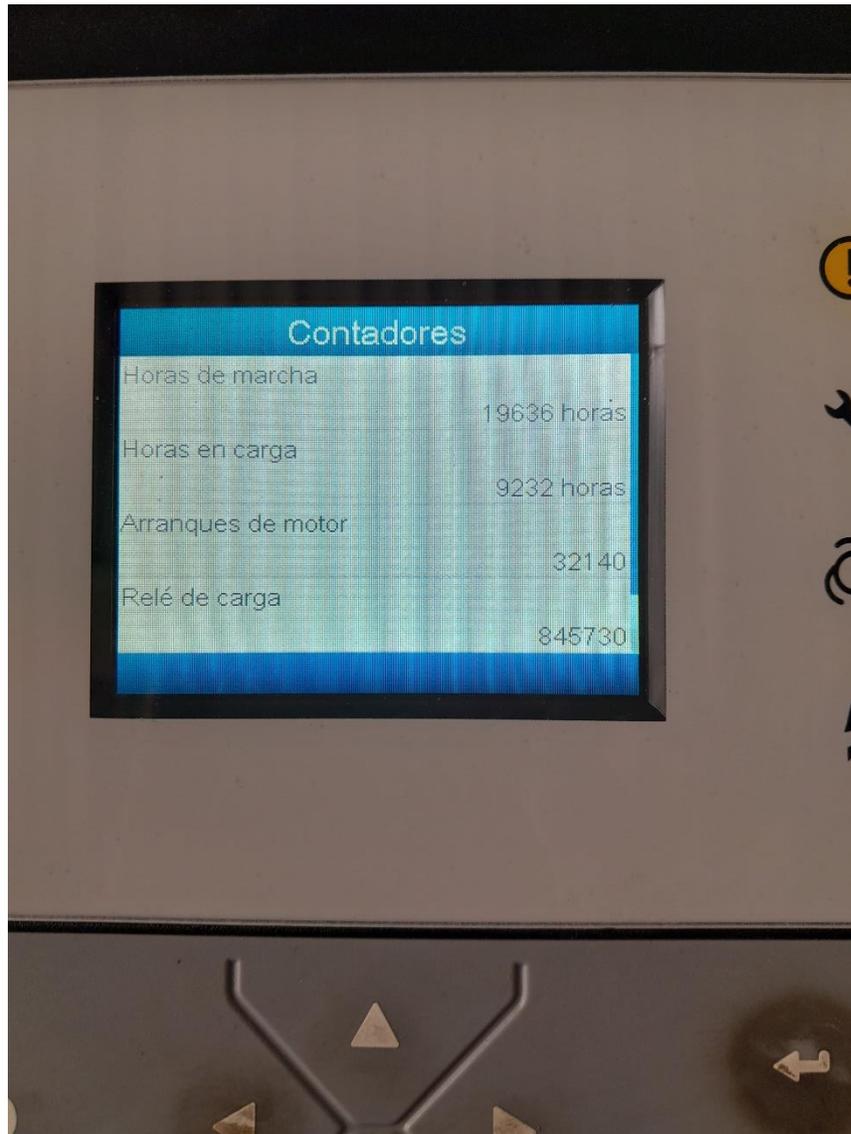
*Toma de mediciones de amperaje de compresor*



*Nota.* Toma de mediciones de amperaje de compresor. Elaboración propia.

### Apéndice 3.

#### *Muestra de contadores de compresor*



*Nota.* Toma de contadores de compresor. Elaboración propia.

#### Apéndice 4.

#### Área de aire comprimido



*Nota.* Área de sistema de aire comprimido, a la vista 2 compresores Atlas, dos secadoras y tanque de almacenamiento. Elaboración propia.

## Apéndice 5.

### *Generador de emergencia*



*Nota.* Generador de emergencia. Elaboración propia.

**Apéndice 6.**

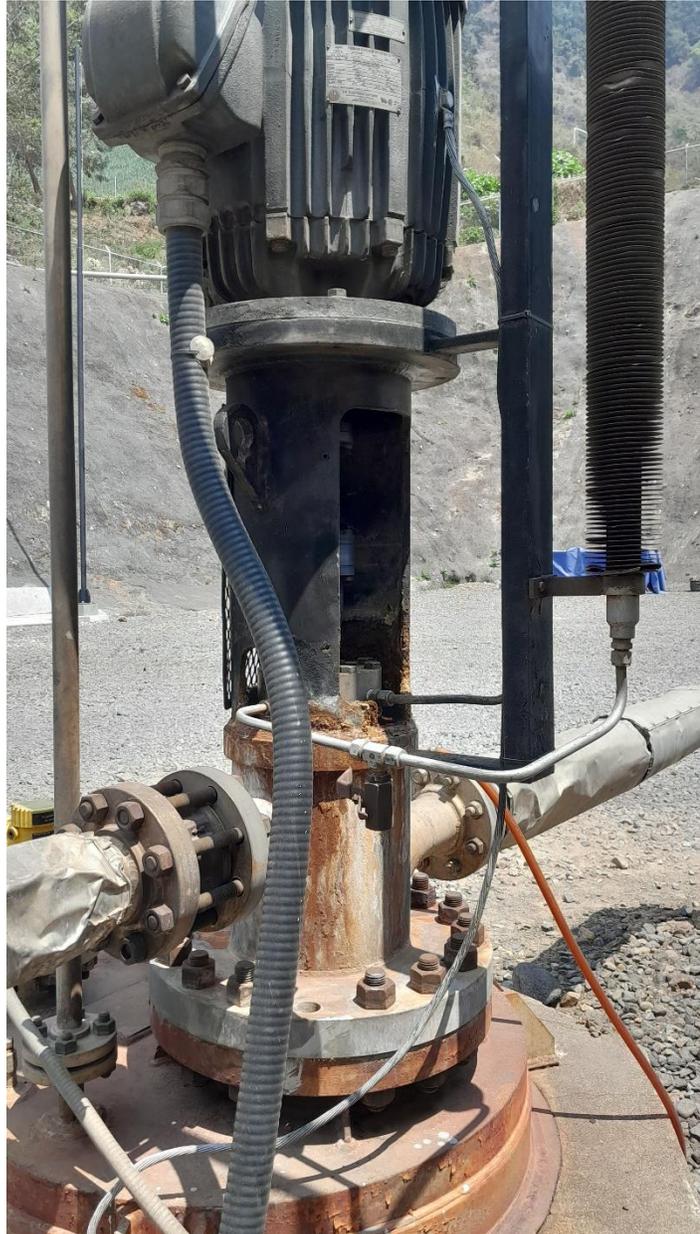
*“Feed pump 1”*



*Nota.* Bomba de motor eléctrico denominada “Feed Pump 1”. Elaboración propia.

## Apéndice 7.

*“Bomba de condensado”*



*Nota.* Bomba de motor eléctrico denominada “Bomba de condensado”. Elaboración propia.

## Apéndice 8.

### Orzunil 1



*Nota.* Parte superior de la planta, se pueden observar los ventiladores que conforman el condensador. Elaboración propia.

# ANEXOS

## Anexo 1.

*Requerimiento de aire comprimido*

ORMAT

ZUNIL I GEOTHERMAL POWER PLANT

SPECIFICATION NO. 7.030 - .70.174 .2

FOR

INSTRUMENT AIR SUPPLY PACKAGE

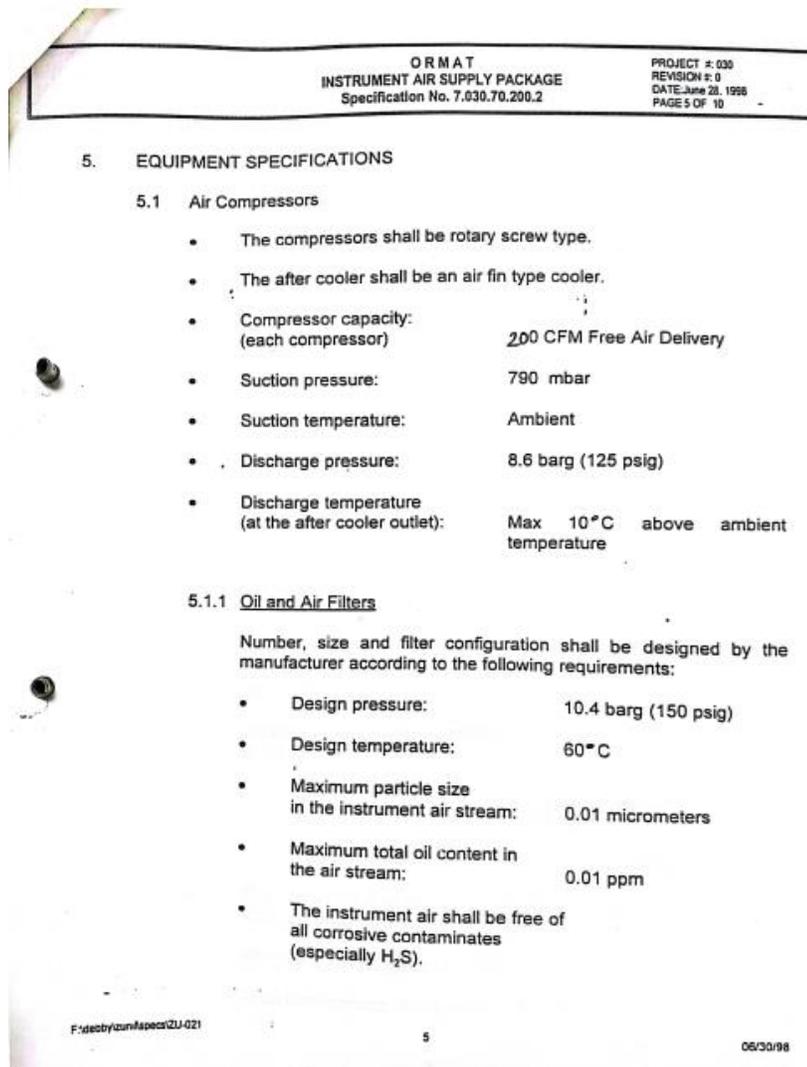
*This information is the proprietary of ORMAT  
and must not be copied without written permission*

REV.	DESCRIPTION	DATE	BY	CHECKED	APPROVED
0	For Quotation	June 30, 1998	AG		L.S.

F:\deby\zun\spec\ZU-021

06/30/98

Continuación del Anexo 1.



*Nota.* Detalle de requerimiento de aire comprimido en planta Orzunil 1. Obtenido de Job Book de la planta Orzunil 1.